Peter Westerheide

AUSGEWÄHLTE VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES BELEGUNGSGRADES IN SCHIENENSYSTEMEN

- dargestellt an einem empirischen Beispiel -

1973

AUSGEWÄHLTE VERFAHREN
ZUR
BESTIMMUNG DES BELEGUNGSGRADES IN SCHIENENSYSTEMEN

- dargestellt an einem
empirischen Beispiel -

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaft
durch den
Fachbereich Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
der Westfälischen Wilhelms-Universität zu Münster

vorgelegt von
Dipl.-Volksw. Peter Westerheide
aus Insterburg

1973

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Erster Berichterstatter:	Prof.Dr.H.Gülicher
Zweiter Berichterstatter:	Prof.Dr.J.Bleymüller
Dekan:	Prof.R.H.Tilly,Ph.D.
Tag der mündlichen Prüfung:	3.Mai 1973

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1 PROBLEMSTELLUNG 1

2 DIE BESTIMMUNG DES BELEGUNGSGRADES EINES EINZELNEN STRECKENABSCHNITTS 7

2.1 Die kürzeste Zugfolgezeit 7

2.1.1 Die kürzeste Zugfolgezeit als entscheidende Bestimmungsgröße für den Belegungsgrad 7

2.1.2 Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeit 8

2.1.2.1 Die Zugfolgezeit 8

2.1.2.2 Der Zugfolgeabschnitt 10

2.1.2.3 Die Belegungszeit für einen Zugfolgeabschnitt 12

2.1.2.4 Rechnerische Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeit 13

2.1.3 Anmerkungen zur praktischen Ermittlung der Zugfolgezeiten 15

2.2 Die Pufferzeit 18

2.3 Der Belegungsgrad eines einzelnen Strekkenabschnitts 21

2.4 Praktische Ermittlung des Belegungsgrades für einen einzelnen Streckenabschnitt 21

3 DIE BESTIMMUNG DES GESAMTBELEGUNGSGRADES FÜR MEHRERE STRECKENABSCHNITTE 29

3.1 Aufstellung eines Graphen der Pufferzeiten für die Gesamtstrecke 29

3.1.1 Allgemeine Definition eines Graphen 29

3.1.2 Graph der Pufferzeiten 31

3.2 Ableitung des Belegungsgrades aus der Summe der minimalen Kantenwerte des Graphen . 35

3.3 Vergleich der Einzelbelegungsgrade mit dem Gesamtbelegungsgrad 35

Seite

3.4 Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades mit Hilfe einer Pufferzeittabelle 37
3.5 Algorithmus zur Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades 40

4 ANWENDUNG DES THEORETISCHEN MODELLS AUF EIN PRAKTISCHES BEISPIEL 51
4.1 Streckencharakteristik 51
4.2 Datenmaterial 52
4.2.1 Gewinnung des Datenmaterials 52
4.2.2 Datenaufbereitung 53
4.3 Programmbeschreibung 54
4.4 Ergebnisse 57
4.4.1 Ergebnisse für die Einzelabschnitte.. 57
4.4.2 Ergebnisse für die Gesamtstrecke 65
4.4.3 Statistik der Pufferzeiten 71
4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 77

5 BESTIMMUNG DES BELEGUNGSGRADES EINER VORGEGEBENEN STRECKE MIT HILFE EINES SIMULATIONSMODELLS 81
5.1 Das Problem der Zugverspätungen 81
5.2 Die Verteilung der Zugverspätungen im Anfangsbahnhof der Strecke 85
5.3 Simulation der Verspätungen 89
5.3.1 Begründung für die Anwendung der Simulation zur Bestimmung des Belegungsgrades in Schienensystemen 89
5.3.2 Der Aufbau des Simulationsmodells ... 92
5.3.3 Normalverteilte Verspätungen 100
5.3.4 Exponentiell verteilte Verspätungen . 105
5.3.5 Empirisch verteilte Verspätungen 109
5.3.6 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse 113

Seite

6 SCHLUSSBETRACHTUNG 115
ANHANG 119
LITERATURVERZEICHNIS 133

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Seite

Abb. 2-1: Zugfolgezeiten 9

Abb. 2-2: Die Elemente des Zugfolgeabschnitts 11

Abb. 2-3: Die Belegungszeit c_z eines Zugfolgeabschnitts 13

Abb. 2-4: Berechnung der kürzesten Zugfolgezeit .. 13

Abb. 2-5: Bedienungszeit t_a des zum Ausfahrtsignal durchfahrenden Zuges 17

Abb. 2-6: Die Pufferzeit r 17

Abb. 2-7: Bildfahrplanausschnitt 22

Abb. 3-1: Darstellung des Graphen G 31

Abb. 3-2: Bildfahrplanausschnitt mit Pufferzeiten. 33

Abb. 3-3: Graph der Pufferzeiten 34

Abb. 4-1: Der Zusammenhang zwischen Größe und Anzahl von Zeitlücken 75

Abb. 5-1: Transformation gleichverteilter Zufallszahlen 94

Abb. 5-2: Flußdiagramm des Simulationsmodells 98

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Seite

Tab. 3-1: Pufferzeitsummen und Belegungsgrade für den Bildfahrplanausschnitt der Abb. 3-2 36

Tab. 3-2: Pufferzeittabelle für den Bildfahrplanausschnitt der Abb. 2-7 39

Tab. 3-3: Matrix der kürzesten Pufferzeiten 41

Tab. 3-4: Matrix der den Streckenabschnitten zugeordneten kürzesten Pufferzeiten 42

Tab. 3-5: Korrigierte Matrix der kürzesten Pufferzeiten 43

Tab. 3-6: Gesamtpufferzeiten und zugehörige Folgen der Züge und Streckenabschnitte ... 47

Tab. 3-7: Gesamtpufferzeiten zwischen n durchgehenden Zügen des untersuchten Beispiels 49

Tab. 4-1: Charakteristische Merkmale der untersuchten Strecke AF 51

Tab. 4-2: Abfahrt und Ankunft in den einzelnen Streckenabschnitten über den gesamten Tag (für N = 137 Züge) 55

Tab. 4-3: Streckenabschnitt 1 58

Tab. 4-4: Streckenabschnitt 2 59

Seite

Tab. 4- 5: Streckenabschnitt 3 60

Tab. 4- 6: Streckenabschnitt 4 61

Tab. 4- 7: Streckenabschnitt 5 62

Tab. 4- 8: Pufferzeitsummen und Belegungsgrade für die Einzelabschnitte der Strecke AF (Zeitraum 24 Stunden) 63

Tab. 4- 9: Pufferzeitsummen und Belegungsgrade der Strecke AF für ausgewählte Zeiträume 65

Tab. 4-10: Kürzeste Pufferzeiten und zugehörige Streckenabschnitte für die ersten 47 Verknüpfungen der Strecke AF 66

Tab. 4-11: Minimale Gesamtpufferzeiten zwischen durchfahrenden Zügen 68

Tab. 4-12: Gesamtbelegungsgrad der Strecke AF für verschiedene Tageszeiträume 69

Tab. 4-13: Belegungsgrade für mögliche Kombinationen mehrerer aufeinanderfolgender Streckenabschnitte der Strecke AF 70

Tab. 4-14: Häufigkeitsverteilungen für die Pufferzeiten der Strecke AF 73

Tab. 4-15: Zusammenstellung möglicher zusätzlich einzulegender Züge 77

Seite

Tab. 5-1: Häufigkeitsverteilung der Verspätungen der im Bahnhof A aus verschiedenen Richtungen eintreffenden Züge 88

Tab. 5-2: Konstruiertes Beispiel zum Simulationsmodell 89

Tab. 5-3: Ergebnis eines Simulationslaufes für normalverteile Verspätungen 102

Tab. 5-4: Häufigkeitsverteilung des Belegungsgrades bei normalverteilten Verspätungen .. 103

Tab. 5-5: Verteilung der Belegungsgrade bei normalverteilten Verspätungen 103

Tab. 5-6: Häufigkeitsverteilung transformierter Belegungsgrade bei normalverteilten Verspätungen 104

Tab. 5-7: Verteilung der transformierten Belegungsgrade bei normalverteilten Verspätungen 104

Tab. 5-8: Ergebnis eines Simulationslaufes für exponentiell verteilte Verspätungen 106

Tab. 5-9: Häufigkeitsverteilung der Belegungsgrade bei exponentiell verteilten Verspätungen 107

Seite

Tab. 5-10: Verteilung der Belegungsgrade bei exponentiell verteilten Verspätungen ... 107

Tab. 5-11: Häufigkeitsverteilung transformierter Belegungsgrade bei exponentiell verteilten Verspätungen 108

Tab. 5-12: Verteilung der transformierten Belegungsgrade bei exponentiell verteilten Verspätungen 108

Tab. 5-13: Ergebnis eines Simulationslaufes für empirisch verteilte Verspätungen 110

Tab. 5-14: Häufigkeitsverteilung der Belegungsgrade bei empirisch verteilten Verspätungen 111

Tab. 5-15: Verteilung der Belegungsgrade bei empirisch verteilten Verspätungen 111

Tab. 5-16: Häufigkeitsverteilung transformierter Belegungsgrade bei empirisch verteilten Verspätungen 112

Tab. 5-17: Verteilung der transformierten Belegungsgrade bei empirisch verteilten Verspätungen 112

1 PROBLEMSTELLUNG

Zur Problematik der theoretischen Bestimmung des Belegungsgrades für eine vorgegebene Eisenbahnstrecke sind in vielen Ländern, die auf ein reibungslos funktionierendes Eisenbahnnetz angewiesen sind, zahlreiche Veröffentlichungen erschienen.[1] Bei den meisten dieser Veröffentlichungen steht im Vordergrund eine Darstellung analytischer Techniken und mathematischer Verfahren, mit deren Hilfe die Belastbarkeit einer Strecke ermittelt werden kann. Dabei ging man lange Zeit in der Literatur überwiegend davon aus, daß die Leistungsfähigkeit einer aus mehreren Streckenabschnitten bestehenden Strecke identisch sei mit der Leistungsfähigkeit des am stärksten belasteten Streckenabschnitts.[2] Diese Auffassung wurde vor allem durch Arbeiten an der Technischen Hochschule in Dresden widerlegt, in denen nachgewiesen wurde, daß der Gesamtbelegungsgrad einer Strecke wesentlich höher als der maximale Einzelbelegungsgrad sein kann.[3]

---

1) Aus der Vielzahl der Beiträge seien beispielhaft erwähnt: T. TAKANASHI: Theories of Track Capacity Calculation. In: Japan Railsways Engineering, Tokio 1962, H. 3; G.MATTHYS/ M. RICARD: Etude du Dèbit maximum en Marches R.O. Directes entre deux triages d'une Section de double Voie non banalisée siège d'un Trafic Prioritaire. In: Revue Francaise de Recherche Opérationelle, Paris 1960, Nr. 15, S. 117 - 146; A.M. BARANOW/A.D. KARETNIKOW: Neues Verfahren zur Berechnung der Durchlaßfähigkeit der Eisenbahnen. In: Shelsn. Transp., Moskau 1962, H. 1. - Übersetzung 2153 des Dokumentationsdienstes der D.B.

2) Vgl. M. BIANCHI: Potenzialità di linee ferroviarie (Die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken). In: Ingegneria Ferroviaria, Rom 1964, H. 12, S. 981-993. - Übersetzung 2735 des Dokumentationsdienstes der D.B., S. 16.

3) Vgl. G. ADLER: Die Verkettung der Streckenbelegungen und der Belegungsgrad einer Gesamtstrecke, Diss. 1968, Dresden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, über die deterministische Bestimmung von Einzel- und Gesamtbelegungsgrad hinaus unter Einbeziehung stochastischer Störgrößen anhand eines Simulationsmodells eine Obergrenze für den Belegungsgrad vorgegebener Strecken anzugeben. Dazu wurde ein Programm entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, für ein empirisches Beispiel

- den Belegungsgrad der Einzelabschnitte
- den Gesamtbelegungsgrad
- den Belegungsgrad bei Simulation des Betriebsablaufs

relativ schnell zu ermitteln.

Dieser Aufgabenstellung entsprechend wird im z w e i t e n K a p i t e l auf die Bestimmung des Belegungsgrades in den einzelnen Teilabschnitten einer Gesamtstrecke eingegangen. Dazu werden ausgehend von einem Bildfahrplan[1] unter Einbeziehung der für die untersuchte Strecke gültigen Betriebsdaten wie Länge der einzelnen Abschnitte, Standorte der Signale und Vorsignale, Sicherheitszuschläge an den Signalen usw. die Grundlagen für die Bestimmung der kürzesten Zugfolgezeiten, d.h. des Mindestabstandes in Minuten, in dem aus Sicherheitsgründen der nachfahrende dem vorfahrenden Zug folgen darf, erörtert.

Aus dem Vergleich dieser kürzesten Zugfolgezeit mit der planmäßigen Folgezeit erhält man die sogenannte Pufferzeit, die als zentrale Größe für die Ermittlung des Einzel- wie auch des Gesamtbelegungsgrades angesehen werden kann.

---

1) Unter einem Bildfahrplan versteht man die graphische Darstellung des Fahrplans in einem Koordinatensystem, auf dessen Ordinate die Tageszeit und auf dessen Abzisse die zugrunde liegende Strecke mit den einzelnen Fahrzeitmeßpunkten abgetragen werden. Vgl. auch die Ausführungen auf S.21ff dieser Arbeit.

Im dritten Kapitel wird zunächst die auf graphentheoretischen Ansätzen beruhende und von G. ADLER[1] entwickelte Pufferzeittabelle zur Berechnung des Gesamtbelegungsgrades dargestellt. Anschließend wird ein sich an die Methode des dynamischen Programmierens anlehnender Algorithmus zur Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades entwickelt.

Die Ergebnisse des auf der Grundlage dieses Algorithmus' erstellten Rechenprogramms werden im vierten Kapitel mit den Ergebnissen für die Berechnung der Einzelbelegungsgrade verglichen.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik wird im fünften Kapitel der Betriebsablauf in der Weise simuliert, daß in das bisher deterministische Modell die stochastische Größe "Verspätung" eingeführt wird. Die sogenannte Monte-Carlo-Technik[2] beruht darauf, daß sich durch Erzeugung (0;1)-rechteckverteilter Zufallszahlen Stichproben gewinnen lassen, deren Werte einer beliebig vorgewählten Wahrscheinlichkeitsverteilung angehören. Aufgabe der Simulation ist es z.B., statistische Aussagen über den dynamischen Ablauf eines bestimmten Systems zu liefern. So wird bei der vorliegenden Untersuchung eine vorgegebene Strecke anhand des Fahrplans auf ihre Leistungsfähigkeit getestet. Durch Variation der Datenkonstellation ließe sich in einem nächsten Schritt der Fahrplan iterativ verbessern, bis eine Optimallösung erreicht ist.

---

1) Vgl. G. ADLER, a.a.O., S. 28 ff.

2) Vgl. zur Monte-Carlo-Technik beispielsweise N.P. BUSLENKO/ J.A. SCHREIDER: Monte-Carlo-Methode und ihre Verwirklichung mit elektronischen Digitalrechnern, Leipzig 1964.

Für die Anwendung von Simulationsverfahren bei Problemstellungen aus dem Bereich der Eisenbahn sprechen insbesondere zwei Gründe:[1)]

- Bei den jeweils zu lösenden Problemen ist in der Regel eine verhältnismäßig große Zahl von Parametern in Ansatz zu bringen und Lösungen aufgrund mathematisch-statistischer Verfahren lassen sich im allgemeinen nicht angeben.

- Eine in Betrieb befindliche Eisenbahn kann aus verschiedenen Gründen nicht zum Gegenstand kontrollierter Experimente gemacht werden.

Durch eine wiederholte Änderung der Abfahrtszeiten der Züge nach Zufallsbedingungen für den gesamten Tagesfahrplan gewinnt man nach einer gewissen Zahl von Simulationen Erwartungswerte und Varianzen für den Belegungsgrad der Gesamtstrecke. Es können dann mit einer vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit Abschätzungen der Leistungsfähigkeit eines Betriebssystems vorgenommen werden, bevor es realisiert wird. Die Simulation wird damit zu einem Hilfsmittel für die Fahrplangestaltung auch in dem Sinne, daß eine Überprüfung des jeweiligen Fahrplans daraufhin erfolgt, ob gewisse gewünschte Kriterien - wie zum Beispiel das Vorhandensein von genügend großen Pufferzeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zügen - erfüllt werden.

---

1) Vgl. P.J. COATES/P.W. CLARK: Ein für den Eisenbahnbetrieb anwendbares Simulationsverfahren. In: Monatsschrift der Internationalen Eisenbahner-Kongreß-Vereinigung: Kybernetik und Elektronik bei den Eisenbahnen, Brüssel 1968, H. 1, S. 42.

Bei der Beschaffung des Datenmaterials war es unumgänglich, auf Betriebsdaten der Deutschen Bundesbahn zurückzugreifen, die nicht für "Dritte" bestimmt sind. Da das Modell auf ein praktisches Beispiel angewendet werden sollte, mußte sich der Verfasser hinsichtlich dieser Daten[1)] auf die Kennzeichnung durch allgemeine Symbole beschränken.

---

1) Hierbei ist insbesondere an die Bahnhofsnamen zu denken.

2 DIE BESTIMMUNG DES BELEGUNGSGRADES EINES EINZELNEN STRECKENABSCHNITTS

2.1 Die kürzeste Zugfolgezeit

2.1.1 Die kürzeste Zugfolgezeit als entscheidende Bestimmungsgröße für den Belegungsgrad

Bei Untersuchungen einzelner Streckenabschnitte hinsichtlich ihres Belegungsgrades ist zunächst die B e l e g u n g s z e i t von Bedeutung, die sich aus der Fahrzeit für das Durchfahren des vom Zug belegten Fahrwegabschnittes und gewissen Zeitzuschlägen[1)] zusammensetzt; sie bezieht sich also auf e i n e Zugfahrt in einem bestimmten Streckenabschnitt.

Für Fahrplanerstellungen und Untersuchungen über die Streckenleistungsfähigkeit ist aber von größerer Bedeutung der zeitliche Abstand z w e i e r Züge an einem bestimmten Fahrzeitmeßpunkt, die sog. Z u g f o l g e z e i t . Wenn Informationen über die kürzest mögliche Aufeinanderfolge von Zügen an den Fahrzeitmeßpunkten und somit über die k ü r z e s t e n Z u g f o l g e z e i t e n für bestimmte Streckenabschnitte bekannt sind, dann läßt sich auch der Belegungsgrad dieser Streckenabschnitte leicht ermitteln. Summiert man nämlich die kürzesten Zugfolgezeiten für einen bestimmten Zeitabschnitt (z.B. für einen Tag = 1440 Min.)

---

1) Zeitzuschläge sind notwendig für die Bedienung der sicherungstechnischen Anlagen.

und setzt die Summe ins Verhältnis zur Summe der fahrplanmäßigen Zugfolgezeiten (für das Beispiel 1440 Min.), so bringt der aus dem Quotienten sich ergebende **Belegungsgrad** zum Ausdruck, wie die zur Verfügung stehende Gesamtzeit (1440 Min.) ausgenutzt würde, wenn jeder Zug dem vorhergehenden mit der kürzest möglichen Zeit folgen würde. Die Differenz zwischen planmäßiger und kürzester Zugfolgezeit bezeichnet man als **Pufferzeit**. Die Pufferzeiten sind also interpretierbar als Zeitlücken, die geeignet sind, entstandene Verspätungen aufzufangen und auszugleichen und andererseits zusätzliche Zugfahrten zuzulassen.

2.1.2 Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeit

2.1.2.1 Die Zugfolgezeit

Die Berechnung der Zugfolgezeiten ist in der Literatur in zahlreichen Arbeiten ausführlich beschrieben worden, die sich in den verwendeten Methoden nur unwesentlich voneinander unterscheiden.[1] Die folgende Darstellung baut vor allem auf dem von POTTHOFF[2] vorgeschlagenen Verfahren auf, weil dieses zur Übertragung in Programmiersprachen besonders geeignet erscheint. Die Zugfolgezeiten beziehen sich auf

---

1) Vgl. G. DILLI: Ihre Majestät, die Toleranz. In: Eisenbahntechnische Rundschau (im folgenden:ETR), 1952 (Heft 1 und 2); W. MÜLLER: Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik. Bd. II, Berlin 1952; G. ZIMMER: Gleisbild und Fahrplan einer langen zweigleisigen Eisenbahnstrecke. In: Monatszeitschrift der Internationalen Eisenbahn - Kongreß - Vereinigung - Kybernetik und Elektronik bei den Eisenbahnen. 1968 (Heft 4), S. 152 - 173. W. ZWERNEMANN: Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfühigkeit zweigleisiger Strecken durch Berechnung der Mindestzugfolgezeiten. In: Bundesbahn 35, 1961 (Heft 15), S. 650-661.

2) G. POTTHOFF: Verkehrsströmungslehre Bd. 1 - Die Zugfolge auf Strecken und Bahnhöfen. Berlin, 1962, S. 40 ff.

eine zweigleisige Strecke, auf der in j e d e r R i c h - t u n g Züge verschiedener Gattungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verkehren.

Abb: 2-1 : Zugfolgezeiten

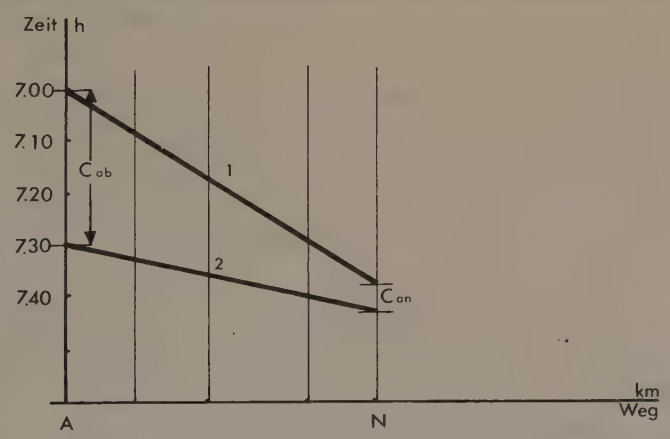


Abb. 2-1 zeigt zwei dem bereits früher erwähnten Bildfahrplan[1)] entnommene Züge, die im zeitlichen Abstand von 30 Min. den Bahnhof A verlassen. Es lassen sich aus der Zeichnung beliebig viele Zugfolgezeiten jeweils an den senkrechten Linien ablesen, von denen den Zeiten zu Anfang (Punkt A) und Ende (Punkt N) der Strecke besondere Bedeutung zukommt. Der Streckenabschnitt $\bar{A}\bar{N}$ besteht aus vier Blockabschnitten, die jeweils durch ein Signal freigegeben werden können. Aus Sicherheitsgründen darf der nachfolgende Zug nicht in einen Blockabschnitt einfahren, bevor der voranfahrende Zug diesen verlassen hat. Der Fahrdienstleiter im Bahnhof A muß also die kürzesten Zugfolgezeiten kennen, wenn eine glatte Be-

1) Vgl. S.2 dieser Arbeit.

triebsführung gewährleistet sein soll, d.h. daß alle Züge den Bahnhof N erreichen, ohne irgendwo aus betriebstechnischen Gründen anhalten müssen.

Daher ist die Kenntnis der kürzesten Zugfolgezeit (c_{ab}) verschiedener den Bahnhof A in gleicher Richtung verlassender Züge von entscheidender Bedeutung für die Durchlässigkeit des Streckenabschnitts. Die Zugfolgezeit im Ausgangsbahnhof N(c_a) ist bei vorgegebener Geschwindigkeit determiniert durch die zeitliche Reihenfolge der Abfahrten im Bahnhof A. Der Fahrtdienstleiter des Endbahnhofs hat keine Möglichkeit der Einflußnahme auf die kürzeste Zugfolgezeit im Bahnhof N.

Um nun die zweckmäßigste Zugfolge für einen aus mehreren Blockabschnitten bestehenden Streckenabschnitt festlegen zu können, müssen die Belegungszeiten für jeden Blockabschnitt auf die Abfahrten im Bahnhof A bezogen werden. Die größte dieser Zugfolgezeiten ist für den gesamten Streckenabschnitt maßgebend und kann deshalb als k ü r z e s t e Z u g f o l g e z e i t bezeichnet werden. Es handelt sich also um eine "Minimax - Aufgabe, bei der das kleinste Maß der Zugfolge durch den größten Wert des ungünstigsten Blockabschnittes bestimmt wird".[1)]

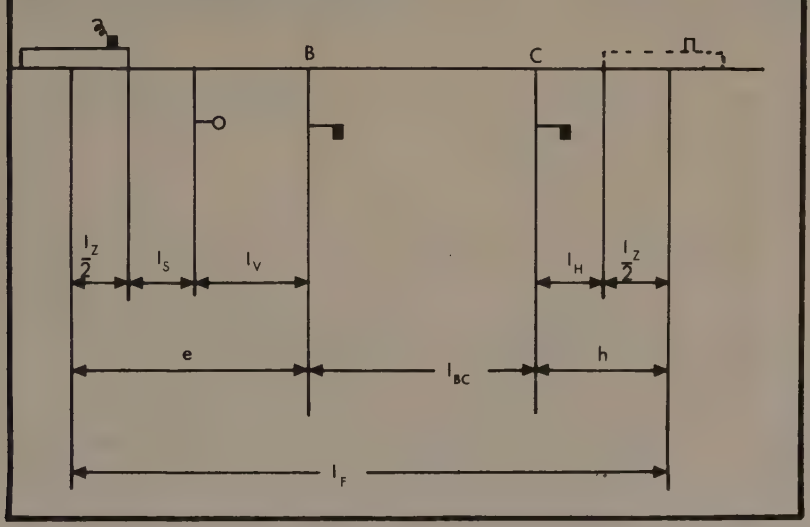
2.1.2.2 Der Zugfolgeabschnitt

Der rechnerischen Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeit soll die Betrachtung eines Z u g f o l g e a b s c h n i t t e s vorangestellt werden.

---

1) G. POTTHOFF: A.a.O., S. 42.

Abb. 2-2 : Der Zugfolgeabschnitt



Der Zugfolgeabschnitt l_F zwischen den Blocksignalen B und C (Abb. 2-2) setzt sich aus folgenden Elementen zusammen:[1)]

$l_2/2$ = halbe Zuglänge des zweiten Zuges

\+ l_s = Sichtstrecke vor dem Vorsignal[2)]

\+ l_v = Vorsignalabstand (zum Hauptsignal)

\+ l_{BC} = Abstand der beiden Hauptsignale

\+ l_H = Hauptsignalabstand bis Zugschlußstelle

\+ $l_1/2$ = halbe Zuglänge des ersten Zuges

l_F = Länge des Zugfolgeabschnitts

---

1) Vgl. G. POTTHOFF: A.a.O., S. 36.

2) Die Sichtstrecke entspricht der Reaktionszeit nach dem Erkennen des Vorsignals.

Der gesamte Zugfolgeabschnitt setzt sich also aus drei Teilen zusammen:[1)]

- Dem Einfahrabschnitt e mit

$$e = l_2/2 + l_s + l_v \qquad (2.1)$$

- dem Fahrzeitmeßbereich l_{BC}
- dem Räumabschnitt h mit

$$h = l_1/2 + l_h \qquad (2.2)$$

wobei h und e als sicherungstechnische Schutzstrecken dienen.

2.1.2.3 Die Belegungszeit für einen Zugfolgeabschnitt

Kennt man die einzelnen Elemente eines Zugfolgeabschnitts, so läßt sich auch die B e l e g u n g s z e i t c_z für e i n e n Zug anschaulich graphisch darstellen (Abb. 2-3).

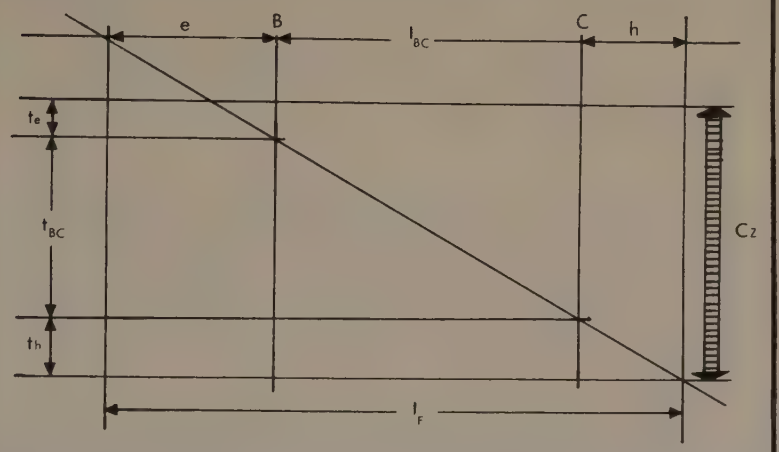
Die Belegungszeit c_z entspricht der Zeit für das Durchfahren des Zugfolgeabschnitts und setzt sich zusammen aus den Zeitelementen für das Durchfahren des Einfahrabschnitts, des Fahrzeitmeßbereichs und des Räumabschnitts

$$c_z = t_e + t_{BC} + t_h \qquad (2.3)$$

---

1) Vgl. G. ADLER: A.a.O., S. 7.

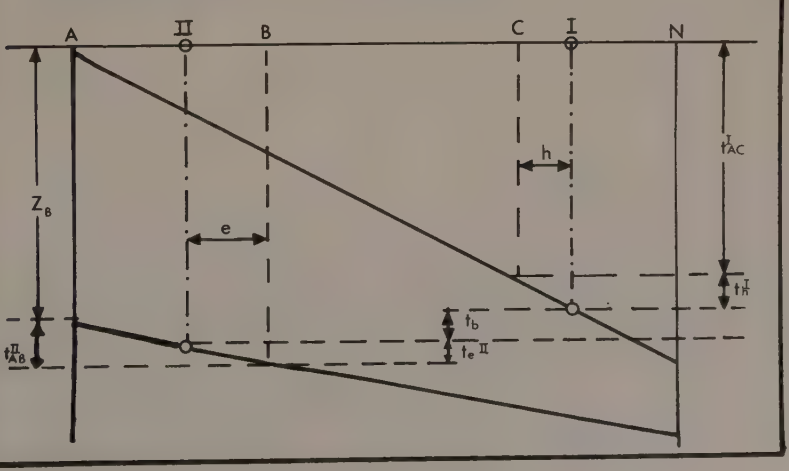
Abb. 2-3: Die Belegungszeit c_z eines Zugfolgeabschnitts



2.1.2.4 Rechnerische Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeit

An Abb. 2-4 soll die rechnerische Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeit graphisch verdeutlicht werden.

Abb. 2-4: Berechnung der kürzesten Zugfolgezeit



Der Streckenabschnitt AN wird durch die Signale B und C in drei Blockabschnitte unterteilt. Für jedes Zugpaar ist die kürzeste Zugfolgezeit für jeden Blockabschnitt zu ermitteln. Die größte dieser Zugfolgezeiten ist die m a ß g e b l i c h e kürzeste Zugfolgezeit.

In Abb. 2-4 befindet sich Zug I um die Schutzstrecke h hinter dem Blocksignal C. Beim Erreichen dieses Punktes wird das Signal in C auf Halt gestellt und das Signal in B auf Fahrt gesetzt. Für diesen Vorgang wird die Bedienungszeit t_b in Anspruch genommen.

Der erste Zug hat zu diesem Zeitpunkt eine Fahrtzeit von $t^I_{AC} + t^I_h$. Der zweite Zug darf sich dem Signal B bis zum Sicherheitsabstand e genähert haben (Pkt. II). Den Sichtpunkt vor dem Vorsignal B hat der nachfolgende Zug also nach einer Zeit $t^{II}_{AB} - t^{II}_e$ erreicht. Wenn die zeitliche Aufeinanderfolge der Abfahrten z in A so bemessen wurde, daß der zweite Zug gerade zum Freigabezeitpunkt des Blockabschnittes BC am Sichtpunkt anlangt, ergibt sich also nach Abb. 2-4 die Zeitgleichung

$$t^I_{AC} + t^I_h + t_b = z_B + t^{II}_{AB} - t^{II}_e \quad . \qquad (2.4)$$

Die Zugfolgezeit der beiden Züge in Beziehung zum Signal B ist dann

$$z_B = t^I_{AC} + t^I_h + t_b - (t^{II}_{AB} - t^{II}_e) \qquad (2.5)$$

Auf diese Weise lassen sich Zugfolgezeiten für Streckenabschnitte mit beliebig vielen Blockabschnitten berechnen. Besonderheiten ergeben sich nur in Hinsicht auf den ersten und letzten Blockabschnitt jedes Streckenabschnitts.

Beim ersten Blockabschnitt setzt sich die Zugfolgezeit z_A aus der Fahrtzeit t^I_{AB} , t^I_h zuzüglich der Stellwerksbedienungszeit t_a am Ausgangsbahnhof A zusammen zu

$$z_A = t^I_{AB} + t^I_h + t_a \quad . \tag{2.6}$$

Der letzte Blockabschnitt wird um die Bedienungszeit t_b nach Ankunft des ersten Zuges in N wieder freigegeben, so daß sich als Zugfolgezeit für das Signal N-1 ergibt:

$$z_{N-1} = t^I_{AN} + t_b - (t^{II}_{A(N-1)} - t^{II}_e). \tag{2.7}$$

Auf diese Weise werden für jeden Streckenabschnitt die verschiedenen Zugfolgezeiten z_i ($i = A,\ldots,N-1$) berechnet. Die größte so ermittelte Zugfolgezeit ist die gesuchte k ü r z e s t e Z u g f o l g e z e i t.

2.1.3 Anmerkungen zur praktischen Ermittlung der Zugfolgezeiten

Für die praktische Ermittlung der kürzesten Zugfolgezeiten eines gegebenen Streckenabschnitts werden folgende Informationen benötigt:

1. Länge des gesamten Streckenabschnitts
2. Anzahl und Standorte der Signale und Vorsignale
3. Fahrzeit vom Ausgangs- bis zum Endbahnhof
4. Art des Zuges
   Die Art des Zuges ist mitentscheidend für die Länge des Einfahr- bzw. Räumabschnittes. Dabei soll zur Vereinfachung von folgenden Durchschnittslängen der Zuggattungen ausgegangen werden:[1)]

---

1) Vgl. auch G. ADLER: A.a.O., S. 8.

Reisezüge = 200 m
Güterzüge = 600 m.

Unterstellt man für die schneller fahrenden Reisezüge eine Sichtstrecke vor dem Vorsignal l_s einheitlich von 400 m und für Güterzüge von 200 m, so gilt für den Einfahrabschnitt gemäß (2.1)
bei Reisezügen: $e = 100\ m + 400\ m + l_v$
bei Güterzügen: $e = 300\ m + 200\ m + l_v$.
Unter diesen Annahmen kann man also einheitlich von einem Einfahrabschnitt von $e = 500 + l_v$ ausgehen.

Legt man im Räumabschnitt für den Abstand des Signals bis zur Zugschlußstelle (l_h) einen Durchschnittswert von 200 m zugrunde, so erhält man als Räumabschnittslänge gemäß (2.2)
bei Reisezügen: h = 200 m + 100 m = 300 m
bei Güterzügen: h = 200 m + 300 m = 500 m.
Durch die Art des Zuges ist also die Länge des Einfahr- bzw. Räumabschnitts festgelegt.

5. Bedienungszeiten

Die Bedienungszeit t_b für den Streckenblock ist davon abhängig, ob es sich um einen handbedienten Block oder um einen Selbstblock handelt. Während beim Selbstblock die Blockstrecke durch den Zug automatisch freigegeben und gesperrt wird, die Bedienungszeit t_b also mit Null angesetzt werden kann, ist man bei handbedientem Block auf Beobachtungs- und Erfahrungswerte angewiesen.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Strecke war auf allen Streckenabschnitten mit Selbstblocks ausgestattet, so daß

$$t_b = 0$$

unterstellt werden konnte.

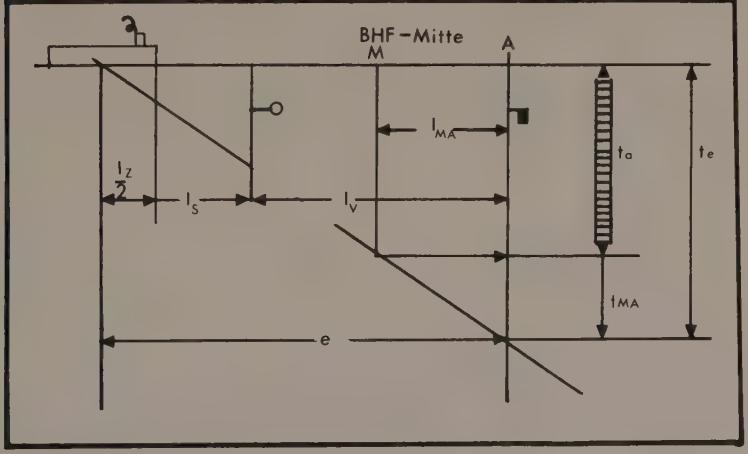
Die Bedienungszeit t_a, deren Kenntnis für den jeweils ersten Blockabschnitt eines Streckenabschnitts gemäß (2.6) notwendig ist, ist davon abhängig, ob der nachfolgende Zug im Ausgangsbahnhof d u r c h - oder a n f ä h r t.

Für anfahrende Züge liegen empirische Untersuchungen vor,[1] nach denen für das Geben und Wahrnehmen des Abfahrtsauftrages mit ca. 0,4 Min. gerechnet werden kann.

Fährt der nachfolgende Zug im Ausgangsbahnhof durch, ist die Bedienungszeit t_a[2] bezogen auf die Bahnhofsmitte gemäß Abb. 2-5

$$t_a = t_e - t_{MA}.$$ [3]

Abb. 2-5: Bedienungszeit t_a des am Ausfahrtsignal durchfahrenden Zuges



1) Vgl. E. BEHR: Der Fahrtenabhängigkeitsplan für große Personenbahnhöfe. In: Org. Fortschr. Eisenbahner, 93 (1938), H. 14, S. 259-267; P. GOTTSCHALK: Die betriebliche Leistungsfähigkeit der Hohenzollernbrücke in Köln. In: ETR, Archiv Eisenbahntechnik 1 (1952), S. 3-10.

2) Auch hier wird $t_b = 0$ unterstellt.

3) Vgl. dazu auch Abb. 2-2 und Formel (2.1).

2.2. Die Pufferzeit

Kennt man die kürzesten Zugfolgezeiten für jedes Zugpaar eines gegebenen Fahrplans, so lassen sich daraus leicht Schlüsse auf die zentrale Größe bei Untersuchungen über die Streckenleistungsfähigkeit, die jeweilige P u f f e r z e i t zwischen zwei Zügen, ziehen. Pufferzeiten, in der Literatur auch als Toleranz[1], Zeitrückhalt[2] oder Reserve[3] bezeichnet, sind zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zügen sich ergebende Zeitlücken. Sie können beispielsweise dazu verwandt werden, Störungen des Betriebsablaufs aufzufangen oder auch zusätzliche Züge in den Fahrplan einzuschieben. Rechnerisch erhält man die Pufferzeit r als D i f f e r e n z von f a h r p l a n m ä ß i g e r und k ü r z e s t e r Zugfolgezeit (vgl. Abb. 2-6), so daß definiert werden kann

$$r = z_F - c_{min} \qquad (2.8)$$

wobei z_F die fahrplanmäßige, also die dem Bildfahrplan zu entnehmende Zugfolgezeit bedeutet, während c_{min} die theoretisch kürzeste Zugfolgezeit angibt.

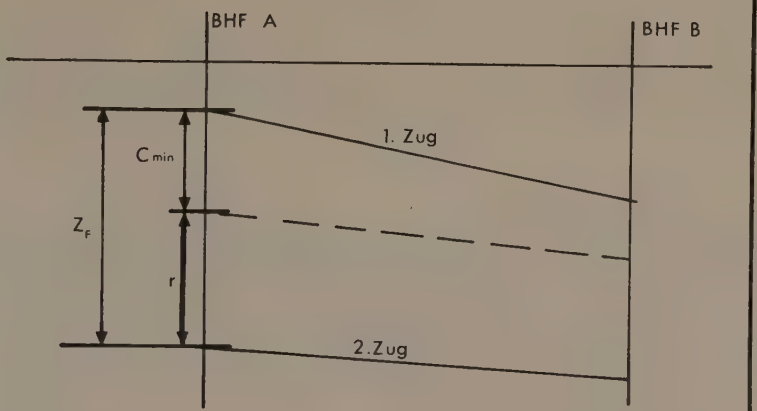
---

1) Vgl. G. DILLI: A.a.O., S.21.

2) Vgl. W. MICHELFELDER: Verspätungsübertragung bei dichtem Zugverkehr und ihre Auswirkung auf Fahrplangestaltung, Streckenleistung und Signaltechnik. Diss.1950, Darmstadt, S. 77.

3) Vgl. O. HAPPEL: Leistungssteigerung betrieblicher Engpässe durch neue Signaltechnik. In: Signal und Draht 46, 1954, H. 1, S.1.

Abb. 2-6: Die Pufferzeit r



Die Pufferzeit ist somit eine bei im Betriebsablauf auftretenden Unregelmäßigkeiten beanspruchbare Zeitspanne mit dem Zweck, "die Übertragung der Verspätung eines Zuges auf einen anderen Zug zu mildern oder, wenn möglich, ganz zu verhindern."[1)]

Wie groß r sein müßte, um Störungen gänzlich zu vermeiden, ist von Fall zu Fall festzulegen. Eine allgemeingültige Formel zur Ermittlung der erforderlichen Größe der Pufferzeit kann wohl kaum aufgestellt werden.[2)] DILLI[3)] hat für Engpässe, durch die besonders häufig Verspätungen hervorgerufen

1) Vgl. G. DILLI: A.a.O., S. 23.

2) Vgl. G. GREMMINGER: Die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken - eine Folge des geringsten Zugabstandes. Diss. 1955, Braunschweig, S. 27.

3) Vgl. G. DILLI: Der wandernde Engpaß und sein Gefolge. In: ETR 1954, H. 2, S. 79.

werden, eine m i t t l e r e Pufferzeit von 5 Min. vorgeschlagen, die sich bei Kenntnis der kürzesten Zugfolgezeiten c für einen bestimmten Beobachtungszeitraum Z leicht ermitteln läßt.

Die Summe der kürzesten Zugfolgezeiten ergibt die Gesamtbelegungszeit W

$$W = \sum_{i=1}^{N_z} c_i \qquad (2.9)$$

wobei N_z die Anzahl der Zugfolgen im Beobachtungszeitraum Z angibt. Die Summe der Pufferzeiten ist dann gegeben durch die Differenz des Beobachtungszeitraumes Z und der Belegungszeitsumme W.

$$R = Z - W \qquad (2.10)$$

und die mittlere Pufferzeit als

$$r_m = \frac{R}{N_z} = \frac{(Z-W)}{N_z} \qquad (2.11)$$

Wie sich bei zahlreichen Streckenuntersuchungen herausstellte,[1)] neigt der Betrieb bei kleineren Werten als r_m = 5 Min. zu Verspätungen, während bei größeren Werten von r_m noch ausnutzbare Leistungsreserven vorhanden sind. Die Analyse der Pufferzeiten sowohl für einzelne Streckenabschnitte als auch für die Gesamtstrecke wird deshalb im weiteren Verlauf der Arbeit im Mittelpunkt der Betrachtung stehen.

2.3 Der Belegungsgrad eines einzelnen Streckenabschnitts

Der Belegungsgrad B eines einzelnen Streckenabschnitts für einen bestimmten Beobachtungszeitraum Z[2)] läßt sich aus der Pufferzeitsumme, die Aufschluß darüber gibt, wieviel Minuten des Beobachtungszeitraums insgesamt nicht durch Zugfahrten belegt sind, wie folgt ableiten:

---

1) Vgl. G. POTTHOFF: A.a.O., S. 121.

2) Der Beobachtungszeitraum Z beträgt im allgemeinen 24 Stunden = 1440 Minuten.

$$B = \frac{(Z - R)}{Z} \cdot 100 \quad [\%] \quad 1) \qquad (2.12)$$

Bei Kenntnis der jeweiligen Pufferzeiten für jedes Zugpaar eines bestimmten Beobachtungszeitraumes ist der Belegungsgrad eines einzelnen Streckenabschnitts also eindeutig festgelegt.

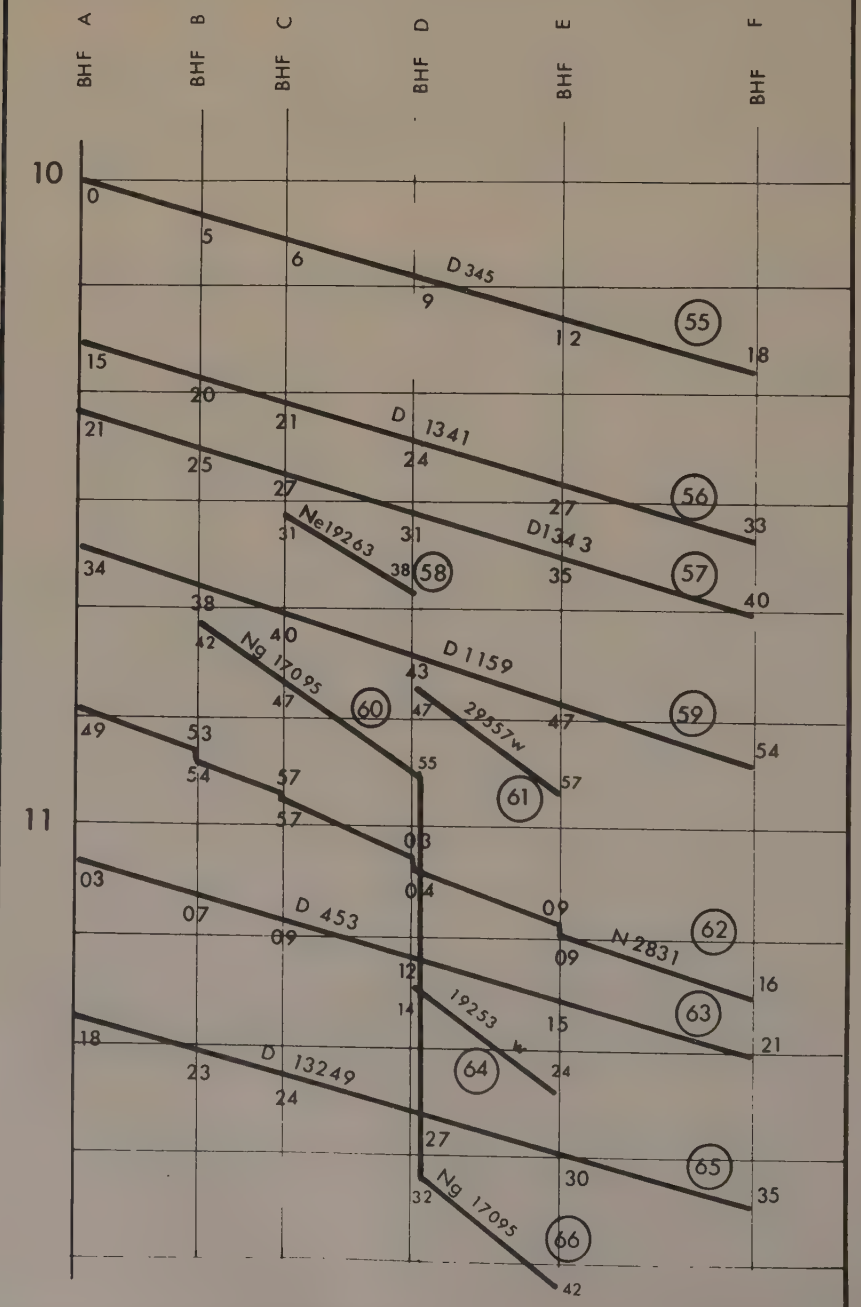
2.4 Praktische Ermittlung des Belegungsgrades für einen einzelnen Streckenabschnitt

Für die praktische Ermittlung des Belegungsgrades empfiehlt es sich, einen einheitlichen Beobachtungszeitraum von $Z = 1440$ Min. festzulegen, da dann die benötigten Daten aus einem in sich geschlossenen für 24 Stunden gültigen B i l d f a h r p l a n entnommen werden können. Solche Bildfahrpläne werden von der Deutschen Bundesbahn der Fahrplangestaltung für die einzelnen Strecken des Fahrplannetzes zugrunde gelegt. Abb. 2-7 zeigt einen Ausschnitt aus einem derartigen Fahrplan, dessen Koordinaten in horizontaler Richtung eine Streckenbeschreibung mit den einzelnen Fahrzeitmeßpunkten enthalten, während in vertikaler Richtung der Zeitablauf dargestellt ist. Im Kopf jedes Bildfahrplans sind noch zusätzliche Informationen über die Strecke wie über die Anzahl der Gleise, Streckenneigungen, Standorte der Blockstellen usw. vorhanden.

---

1) Ein Nachteil dieser in der Literatur üblichen Definition ist darin zu sehen, daß ein Belegungsgrad von 100% in der Praxis nicht möglich ist, weil die Pufferzeitsumme aus Sicherheitsgründen nicht Null werden kann.

Abb. 2-7: Bildfahrplanausschnitt



In dem in Abb. 2-7 dargestellten Ausschnitt sind lediglich die Züge in e i n e r Richtung - von Bahnhof A nach Bahnhof F - dargestellt.

Auf den Fahrplänen der Bundesbahn sind dagegen auch die Züge der Gegenrichtung eingetragen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit soll darauf hier verzichtet werden.

Die jeweiligen Zugfahrten werden üblicherweise als Geraden wiedergegeben, d.h. es wird von konstanten durchschnittlichen Geschwindigkeiten für jede Zugfahrt ausgegangen. Oberhalb der Geraden sind die A n k u n f t s z e i t e n an bestimmten Fahrzeitmeßpunkten (im Beispiel an den Bahnhöfen) abgetragen, während die A b f a h r t s - bzw. D u r c h f a h r t s z e i t e n unterhalb ablesbar sind. Die in Kreise gesetzten Zahlen beinhalten eine vom Verfasser gewählte interne L a u f n u m m e r der Züge, durch die gewährleistet wird, daß jeder Nachfolgezug in jedem Einzelabschnitt eine höhere Laufnummer erhält als der vorhergehende Zug,[1)] was bei der Bestimmung der Einzelbelegungsgrade von Vorteil ist.

Um nun die Belegungsgrade der einzelnen Abschnitte einer bestimmten Strecke zu ermitteln, entnimmt man dem Bildfahrplan für diese Strecke die Informationen über die Abfahrts- und

---

1) So erhält z.B. der letzte im Abschnitt DE fahrende Zug mit der Nr. Ng 17095 eine eigene Laufnummer (66), obwohl er die Fortsetzung des Zuges mit der Laufnummer (60) bedeutet. Wäre dieser Zug ohne Unterbrechung um 10.55 Uhr weitergefahren, hätte er statt (60) die Laufnummer (61) bekommen, weil er sonst im Abschnitt DE eine niedrigere Laufnummer als der vor ihm fahrende Zug erhalten hätte. Eine spätere Zusammensetzung der Züge mit verschiedener Laufnummer, aber g l e i c h e r Z u g n u m m e r, ist unproblematisch.

Ankunftszeiten in den einzelnen Abschnitten sowie über die Gattung der verschiedenen auf der Strecke verkehrenden Züge.[1)]

Die zusätzlich zur Berechnung der kürzesten Zugfolgezeiten benötigten Daten, insbesondere die Standorte der Signale, Vorsignale und Bahnhöfe, werden durch das sogenannte S t r e c k e n b a n d, das zu jeder Strecke der Deutschen Bundesbahn existiert, geliefert. Durch das Streckenband wird eine detaillierte Streckenbeschreibung gegeben in Hinsicht auf Anzahl der Gleise, Neigungen der Strecke, Abzweigstellen, Überholstellen, Signale usw. einschließlich genauester Standortangaben.

Zu Beginn der Rechnung ist es zweckmäßig, die Abfahrts- und Ankunftszeiten in g a n z e Z a h l e n von 0 bis 1440 umzuwandeln. Ganze Zahlen erhält man dadurch, daß man z. B. für die Abfahrtszeiten - angegeben durch Stunden (t_S) und Minuten (t_M) - folgende Umrechnung vornimmt:

$$t_{ABF} = t_S \cdot 60 + t_M \quad ^{2)} \qquad (2.13)$$

Die gleiche Transformation wird für die Ankunftszeiten durchgeführt.

Man erhält dann die Fahrzeit eines Zuges definitionsgemäß als Differenz zwischen Ankunfts- und Abfahrtszeit.

---

1) Diese Informationen werden dadurch erleichtert, daß für Reisezüge schwarze und für Güterzüge blaue Farben verwendet werden. Außerdem sind schnell fahrende Züge leicht daran zu erkennen, daß sie stärker im Druck hervorgehoben sind.

2) Für die Abfahrtszeit 3.56 Uhr erhält man also z.B. $t_{ABF} = 3 \cdot 60 + 56 = 236$.

Damit können die Zugfolgezeiten für die einzelnen B l o c k-a b s c h n i t t e, die durch die Signalstandorte innerhalb eines Streckenabschnitts festgelegt sind, mit Hilfe von (2.5), (2.6) und (2.7) ermittelt werden.

Die Zugfolgezeit für den e r s t e n Blockabschnitt setzt sich zusammen aus der Bedienungszeit im Ausgangsbahnhof und der Fahrzeit bis zum Ende des Räumabschnittes hinter dem ersten Signal.[1)]

Wenn man unterstellt, daß das Verhältnis zwischen der Fahrzeit bis zum Ende des Räumabschnitts und der bis zu diesem Punkt zurückgelegten Strecke[2)] genau so groß ist wie das Verhältnis der Gesamtfahrzeit $t_{j,k}$ zur gesamten Streckenlänge l_k, dann ergibt sich die Zugfolgezeit $z_{1,j,k}$[3)] aus der Gleichung

$$\frac{z_{1,j,k} - t_a}{a_{1,k} + h_{j,k}} = \frac{t_{j,k}}{l_k}$$

$$\text{zu } z_{1,j,k} = (a_{1,k} + h_{j,k}) \frac{t_{j,k}}{l_k} + t_a \quad [4)] \qquad (2.14)$$

---

1) Vgl. dazu Formel (2.6) auf S.15.

2) Diese Strecke setzt sich zusammen aus der Entfernung bis zum ersten Signal ($a_{1,k}$) und dem Räumabschnitt ($h_{j,k}$) (j = Zuglaufnummer, k = Streckenabschnitt).

3) Allgemein $z_{i,j,k}$ mit i = 1,m als Index für den Blockabschnitt.

4) Diese Unterstellung ist zulässig infolge der konstanten Durchschnittsgeschwindigkeiten (vgl. S.23 dieser Arbeit) der Züge.

Da der Vorsignalabstand l_v nicht bei allen Signalen gleich ist, so daß der Einfahrabschnitt e für jedes Signal unterschiedliche Werte

$$e_{i,k} = 500 + l_{v_{i,k}} \quad (i=2,m-1)$$ [1)]

annehmen kann, ergibt sich für den z w e i t e n b i s v o r l e t z t e n Blockabschnitt analog zu (2.5) die Zugfolgezeit mit

$$z_{i,j,k} = (a_{i,k}+h_{j,k}) \frac{t_{j,k}}{l_k} - (a_{i-1,k}-e_{i-1,k}) \frac{t_{j+1,k}}{l_k} + t_b$$

$$(i=2,m-1) \qquad (2.15)$$

Schließlich erhält man für den letzten Blockabschnitt gemäß (2.7)

$$z_{m,j,k} = t_{j,k} - (a_{m-1,k}-e_{m-1,k}) \frac{t_{j+1,k}}{l_k} + t_b \qquad (2.16)$$

Aus den so ermittelten Zugfolgezeiten ergibt sich nun für jeden Zug j in jedem Streckenabschnitt k die kürzeste Zugfolgezeit $c_{j,k}$ als das Maximum der Zugfolgezeiten in den Blockabschnitten i. Für einen Streckenabschnitt mit m Blockabschnitten gilt dann

$$c_{j,k} = \max \left\{ z_{i,j,k} \right\} \quad \text{für } i=1,\ldots,m \qquad (2.17)$$

Über den Vergleich der kürzesten Zugfolgezeit eines Zuges mit der planmäßigen Zugfolgezeit $p_{j,k}$ erhält man dann gemäß (2.8)

$$r_{j,k} = p_{j,k} - c_{j,k} \qquad (2.18)$$

---

1) Vgl.(2.1) auf S.12 sowie S.16 dieser Arbeit.

d.h. die Pufferzeit r eines Zuges j im Abschnitt k ist festgelegt durch die Differenz der planmäßigen und der theoretisch kürzesten Zugfolgezeit dieses Zuges in diesem Abschnitt.

Damit läßt sich der Belegungsgrad eines einzelnen Streckenabschnitts k für N_z Züge eines Tages analog zu (2.12) praktisch ermitteln als

$$B_k = \frac{1440 - \sum_{j=1}^{N_z} r_{j,k}}{1440} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (2.19)$$

3 DIE BESTIMMUNG DES GESAMTBELEGUNGSGRADES FÜR MEHRERE STRECKENABSCHNITTE

3.1 Aufstellung eines Graphen der Pufferzeiten für die Gesamtstrecke

Nach der Bestimmung des Auslastungsgrades e i n z e l n e r Streckenabschnitte soll im folgenden der Belegungsgrad m e h r e r e r zusammenhängender Streckenabschnitte betrachtet werden. Hierzu bedient man sich eines Graphen der Pufferzeiten.[1)]

3.1.1 Allgemeine Definition eines Graphen

Ein Graph besteht aus einer Menge E von K n o t e n , einer Menge K von K a n t e n (die mit E elementefremd ist) und einer Abbildung Φ .[2)] Φ heißt die dem Graphen zugeordnete I n z i d e n z a b b i l d u n g. Ein Graph wird also durch das Tripel $G = (E, K, \Phi)$ beschrieben.

Die Knoten lassen sich als Punkte in einer Ebene interpretieren und entsprechend die Kanten als deren Verbindungslinien. Die Inzidenzabbildung ordnet den Elementen von K jeweils zwei Elemente von E zu.[3)] Sie legt damit fest, welche Elemente durch eine Kante verbunden werden.[4)]

---

1) Vgl. ADLER, G.: A.a.O., S. 29.

2) Vgl. BUSACKER, R.G./SAATY, Th.L.: Endliche Graphen und Netzwerke. München/Wien, 1968, S. 21.

3) Beispielsweise $\Phi(k_1) = (e_1, e_2)$.

4) S c h l e i f e n und p a r a l l e l e Kanten sind für die in dieser Arbeit zu untersuchenden Probleme ohne Bedeutung. Im folgenden wird deshalb unter "Graph" immer ein s c h l i c h t e r Graph verstanden.

Von einem b e w e r t e t e n Graphen spricht man, wenn jeder Kante eine reelle Zahl s zugeordnet ist. Ein solcher Graph wird durch das Quadrupel $G = (E,K,\Phi,s)$ beschrieben. Der Wert der einzelnen Kanten ist auch als ihre Länge interpretierbar. Für einen aus den Kanten $k_1,\ldots,k_m$ bestehenden Kantenweg T ergibt sich dann die Länge als Summe der Kantenwerte.

$$s(T) = \sum_{j=1}^{m} s(k_j) \qquad (3.1)$$

Wenn den Kanten jeweils ein geordnetes Paar Knoten zugeordnet wird, so daß die Richtung der Kante (von Knoten e_i nach Knoten e_j) eindeutig festgelegt ist - z.B. bei zeitlichen Abfolgen -, erhält man einen g e r i c h t e t e n Graphen. Die Richtung wird in diesem Fall durch Pfeile gekennzeichnet.

Abbildung 3-1 zeigt den gerichteten, bewerteten Graphen

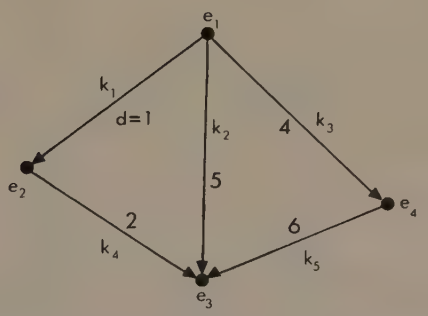
$G = (E,K,\Phi,s)$ mit

$$E = \left\{e_1,e_2,e_3,e_4\right\} \; ; \quad K = \left\{k_1,k_2,k_3,k_4,k_5\right\}$$

und
$$\Phi(k_1) = (e_1,e_2)$$
$$\Phi(k_2) = (e_1,e_3)$$
$$\Phi(k_3) = (e_1,e_4)$$
$$\Phi(k_4) = (e_2,e_3)$$
$$\Phi(k_5) = (e_3,e_4)$$

sowie $s(k_1) = 1$, $s(k_2) = 5$, $s(k_3) = 4$, $s(k_4) = 2$, $s(k_5) = 6$.

Abb. 3-1: Darstellung des Graphen G



Für die Bestimmung des kürzesten Weges vom Knoten e_1 zum Knoten e_3 des Graphen G der Abb. 3-1 erhält man aus den Alternativen

$$s(T_1) = s(k_2) = 5$$

$$s(T_2) = s(k_1) + s(k_4) = 1 + 2 = 3$$

$$s(T_3) = s(k_3) + s(k_5) = 4 + 6 = 10$$

als Lösung den Kantenweg T_2 über die Knoten e_1, e_2 und e_3 mit einer minimalen Länge von 3.

3.1.2 Graph der Pufferzeiten

Wenn die Pufferzeiten für jeden Einzelabschnitt einer Gesamtstrecke bekannt sind und man von der Überlegung ausgeht, "daß die jeweils k ü r z e s t e n Pufferzeiten für die Berechnung des Belegungsgrades mehrerer aufeinanderfolgender Streckenabschnitte maßgebend sein müssen",[1] läßt sich ein

1) Vgl. ADLER, G.: A.a.O., S. 29.

gerichteter, bewerteter Graph der Pufferzeiten konstruieren.

In einem solchen Graphen der allgemeinen Form G = (E,K, Φ,s) werden

die Menge der Knoten E durch die Z ü g e
die Menge der Kanten K durch die Z u g f o l g e n
die Bewertungen s der Kanten k durch die k ü r z e s t e n P u f f e r z e i t e n

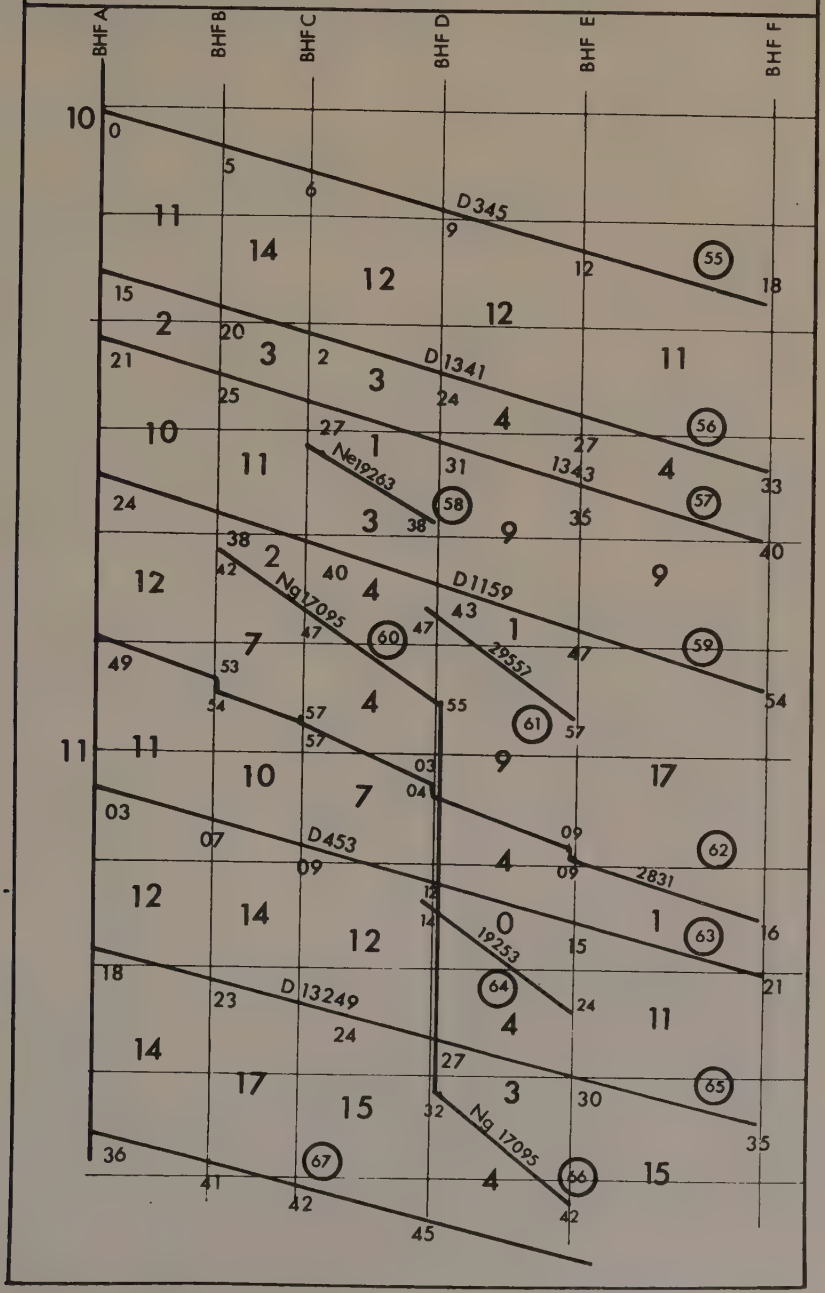
wiedergegeben.

Aus der Summe derjenigen Kantenwerte dieses Graphen, die dem kürzesten Weg vom ersten zum letzten Knoten entsprechen, läßt sich dann der Belegungsgrad für die Gesamtstrecke gemäß (2.12) ermitteln.

Als Beispiel soll der Graph der Pufferzeiten für den Bildfahrplanausschnitt der Abb. 2-7 entwickelt werden. Dazu sind in Abb. 3-2 zunächst die Pufferzeiten in den Bildfahrplan aufgenommen worden.[1)]

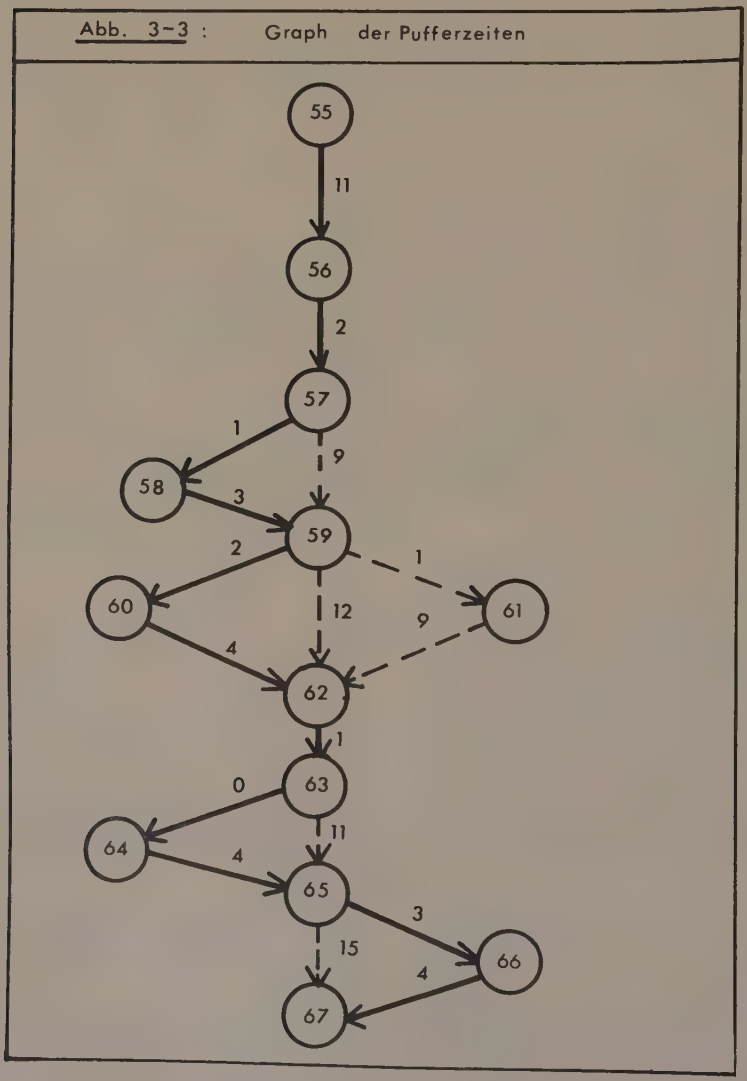
1) Bei der Berechnung sind sämtliche Pufferzeiten auf ganze Zahlen aufgerundet worden.

Abb. 3-2: Bildfahrplanausschnitt mit Pufferzeiten



Von den für jeden Streckenabschnitt eingetragenen Pufferzeiten der Abb. 3-2 werden die jeweils kürzesten zwischen zwei Knoten in den Graphen der Pufferzeiten (Abb. 3-3) übernommen.

Abb. 3-3 : Graph der Pufferzeiten



3.2 Ableitung des Belegungsgrades aus der Summe der minimalen Kantenwerte des Graphen

In Abb. 3-3 entsprechen die Bewertungen der Kanten den minimalen Werten zwischen jeweils zwei Knoten.

Der kürzeste Weg in diesem Graphen besteht in der durchgezogenen Verbindungslinie vom Knoten 55 zum Knoten 67. Die senkrecht unter dem Knoten 55 angeordneten Knoten sind die Züge, die die ganze Strecke ohne überholt zu werden durchfahren. Man kann sich deshalb das Auffinden des kürzesten Weges dadurch erleichtern, daß man abschnittsweise vorgeht, d.h. es wird zunächst der kürzeste Weg zwischen jeweils zwei Zügen bestimmt, die auf der gesamten Strecke nicht überholt werden. Ein solcher Graph läßt sich dann für einen beliebig langen Beobachtungszeitraum und beliebig viele Streckenabschnitte entwickeln.

Für den Bildfahrplanausschnitt der Abb. 2-7 erhält man anhand des Graphen der Abb. 3-3 als Summe der kürzesten Pufferzeiten nach (3.1)

$$s(T) = 11 + 2 + 1 + 3 + 2 + 4 + 1 + 0 + 4 + 3 + 4 = 35,$$

mithin für den zugrunde liegenden Beobachtungszeitraum von $Z = 120$ Minuten als Gesamtbelegungsgrad für die fünf Streckenabschnitte nach (2.12)

$$B_{1,5} = \frac{120-35}{120} \cdot 100 = 71\% \ .$$

3.3 Vergleich der Einzelbelegungsgrade mit dem Gesamtbelegungsgrad

Bestimmt man den Belegungsgrad der e i n z e l n e n Streckenabschnitte für das Beispiel der Abb. 3-2 gemäß (2.19), so erhält man die folgenden Werte:

Tab. 3-1: Pufferzeitsummen und Belegungsgrade für den Bildfahrplanausschnitt der Abb. 3-2

Abschnitt (k)	$\sum_{j=1}^{n_k} r_{j,k}$ (min)	$B_k = \frac{120 - \sum r_{j,k}}{120} 100$ (%)
1	72	40
2	78	35
3	61	49
4	50	58
5	68	43

Einer"häufig vertretenen, aber nicht bewiesenen Auffassung"[1] zufolge wäre demnach der Belegungsgrad der Strecke gleich dem des am stärksten belasteten Streckenabschnitts, d.h. 58%. Ermittelt man dagegen den Gesamtbelegungsgrad nach dem in Abschnitt 3.2 dargestellten Verfahren, erhält man mit 71% einen wesentlich höheren Belegungsgrad als den maximalen der Einzelabschnitte. Es erscheint deshalb sinnvoll, einen Algorithmus zu entwickeln, der aufbauend auf dem beschriebenen Graphen der Pufferzeiten eine automatische Ermittlung des Belegungsgrades einer beliebig langen Strecke für einen beliebigen Beobachtungszeitraum ermöglicht.

Der Nachteil bei der oben dargestellten Methode zur Ermittlung des Belegungsgrades besteht darin, daß der Graph der Pufferzeiten bei langen Strecken und dichten Zugfolgen mit häufigen Überholungen außerordentlich unübersichtlich wird. Deswegen soll zunächst noch auf eine Methode hingewiesen werden, die eine relativ schnelle und einfache Ermittlung der Pufferzeitensumme gestattet, die Aufstellung einer sog. Pufferzeittabelle.[2]

---

1) Vgl. ADLER, G.: A.a.O., S. 31.

2) Vgl. ADLER, G.: A.a.O., S. 33 ff. Die Pufferzeittabelle entspricht im Prinzip der Abb. 3-2 auf S.33.

3.4 Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades mit Hilfe einer Pufferzeittabelle

Zur Aufstellung einer Pufferzeittabelle benötigt man den Bildfahrplan der zu untersuchenden Strecke sowie die Pufferzeiten für die einzelnen Streckenabschnitte. Abweichend von Abb. 3-2 werden die einzelnen Züge, die im Beobachtungszeitraum die Strecke befahren, nicht als entsprechend ihrer Geschwindigkeit geneigte Zeit-Wege-Linien, sondern als waagerechte Leisten in die Pufferzeittabelle eingetragen. Zwischen den Leisten werden für jeden Streckenabschnitt die rechnerisch ermittelten Pufferzeiten vermerkt. In der Tabelle entsprechen also die waagerechten Leisten den Knoten des Graphen der Pufferzeiten und die Felder zwischen den Leisten den Kanten.

Die dem Bildfahrplanausschnitt der Abb. 3-2 entsprechende Pufferzeittabelle ist in Tabelle 3-2 dargestellt.[1] In der Tabelle sind die Felder mit den kürzesten Zugfolgezeiten, die den durchgezogenen Kanten der Abb. 3-3 entsprechen, durch Schraffierung hervorgehoben worden, so daß eventuelle Engpaßstellen oder -abschnitte unmittelbar ersichtlich sind.

Die Auswertung der eigentlichen Pufferzeittabelle der Abb. 3-2 ist in der Form vorgenommen worden, daß die Summe der kürzesten Pufferzeiten zunächst für jeden Abschnitt, sodann schrittweise für mehrere zusammenhängende Abschnitte ermittelt wurde. Aus der Pufferzeitsumme ergibt sich dann der Belegungsgrad gemäß (2.19).

---

1) Auf eine maßstabsgerechte Wiedergabe der Streckenabschnitte einerseits sowie der Abfahrzeiten andererseits kann aus Platzgründen verzichtet werden.

Daß es sich bei dem maximalen Einzelbelegungsgrad von 58,3% im vierten Abschnitt nicht zugleich um den maximalen Belegungsgrad der Gesamtstrecke handelt, läßt sich durch folgende Überlegung verdeutlichen. Wenn man, ausgehend vom ersten Streckenabschnitt, schrittweise weitere Abschnitte zur Berechnung des Gesamtbelegungsgrades hinzuzieht, wird die Summe der kürzesten Pufferzeiten in der Regel abnehmen.[1] Das aber ist gleichbedeutend mit der Erhöhung des Belegungsgrades.

Die Einzelbelegungsgrade im ersten und zweiten Streckenabschnitt betragen b_1 = 40% und b_2 = 35%. Der anhand der kürzesten Pufferzeitsumme für b e i d e Abschnitte ermittelte Belegungsgrad liegt mit 43,3% bereits 3,3 Punkte oder 8,25% über dem maximalen Einzelbelegungsgrad.

Die Pufferzeitsumme des ersten Abschnitts verringert sich durch Hinzunahme des zweiten Abschnitts um 4 Minuten, weil die Pufferzeiten zwischen den Zügen mit den Laufnummern (59) bis (63) nicht mehr 12 und 11, sondern nur noch 9 und 10 Minuten betragen. In allen anderen Fällen sind die Pufferzeiten des ersten Abschnitts zugleich auch die kürzesten.

Bezieht man den dritten Abschnitt mit ein, wird die Pufferzeitsumme zwischen den Zügen (57) und (59) von 10 auf 4, zwischen (59) und (62) von 9 auf 6 und zwischen den Zügen (62) und (63) von 10 auf 7, also insgesamt um weitere 12 Minuten reduziert, wodurch sich der Belegungsgrad von 43,3% für die ersten beiden auf 53,3% für die ersten drei Abschnitte erhöht.

---

1) Im Grenzfall bleibt die Summe bei Hinzunahme des nächsten Abschnitts gleich.

Tabelle 3-2 : Pufferzeittabelle für den Bildfahrplanausschnitt der Abb 2-7

Zeit	Streckenabschnitt 1	2	3	4	5	Zug-laufnr
10^{00}	D 345					55
	13	14	12	12	11	
	D1341					56
	2	3	3	4	4	
	D 1343					57
	10	11	1 / Ne 19263 / 1	9	9	
10^{30}	D 1159					59
	12	1 / 7	4 / 4	1 / 29557w / 9	17	
		Ng 1:095				
		7				
	N 2831					62
	11	10	7	4	1	
11^{00}	D 453					63
	12	14	12	1 / 19253 w / 1	11	
	D 13249					65
	14	17	15	1 / Ng 17095 / 1	15	
11^{30}	D 13435					67

Σr	72	78	61	50	68
$B_{(\%)}$	40	35	49,2	58,3	43,3
Σr	1 u 2 Abschnitt: 68				
$B_{1,2}$	43,3				
Σr	1. bis 3. Abschnitt: 56				
$B_{1,3}$	53,3				
Σr	1 bis 4. Abschnitt: 38				
$B_{1,4}$	68,3				
Σr	1 bis 5. Abschnitt: 35				
$B_{1,5}$	70,8				

Bezogen auf die Gesamtstrecke von 5 Abschnitten erhält man auf diese Weise einen Belegungsgrad von 70,8% gegenüber einem maximalen Einzelbelegungsgrad von 58,3% (im vierten Streckenabschnitt).

Aufgrund dieser für einen Zeitraum von nur ca. 120 Minuten deutlichen Abweichung der beiden Größen voneinander soll im folgenden ein Algorithmus beschrieben werden, der es ermöglicht, die Belastbarkeit einer Gesamtstrecke mit beliebig vielen Streckenabschnitten für einen Beobachtungszeitraum von 24 Stunden relativ schnell zu ermitteln.

In einem späteren Kapitel soll dann untersucht werden, ob bei konstanter Anzahl der Zugfahrten durch zeitliche Verschiebungen der Abfahrten eine Erhöhung des Gesamtbelegungsgrades bewirkt werden kann.

3.5 Algorithmus zur Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades

Neben der Darstellung der Pufferzeiten als gerichteter, bewerteter Graph oder als Pufferzeittabelle empfiehlt sich - besonders bei einer größeren Anzahl von Zügen - die Darstellung in Matrizenschreibweise, wobei die Zeilen den einzelnen vorhergehenden Zügen, die Spalten den ihnen nachfahrenden Zügen entsprechen.

Bezeichnet man die Matrix der kürzesten Pufferzeiten mit $[D]$, dann ist das Element d_{ij} die kürzeste Pufferzeit zwischen dem Zug i und dem Zug j. Für das oben gewählte Beispiel ergibt sich demnach folgende Matrix:

Tabelle 3-3: Matrix der kürzesten Pufferzeiten

Zug i \ Zug j	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
55	11	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
56	·	2	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
57	·	·	1	9	·	·	·	·	·	·	·	·
58	·	·	·	3	·	·	·	·	·	·	·	·
59	·	·	·	·	2	1	12	·	·	·	·	·
60	·	·	·	·	·	·	4	·	·	·	·	·
61	·	·	·	·	·	·	9	·	·	·	·	·
62	·	·	·	·	·	·	·	1	·	·	·	·
63	·	·	·	·	·	·	·	·	0	11	·	·
64	·	·	·	·	·	·	·	·	·	4	·	·
65	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	3	14
66	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	4

Für praktische Aufgabenstellungen ist nicht nur die Bestimmung der Gesamtpufferzeit von Interesse, sondern auch, wie sich die Gesamtpufferzeit aus den einzelnen Pufferzeiten zusammensetzt und in welchen Streckenabschnitten die kürzesten Pufferzeiten beobachtet werden. Erst diese Angaben geben Aufschluß darüber, ob z.B. die Kapazität derjenigen Streckenabschnitte, die besonders stark belastet sind, durch betriebliche Änderungen wie die Errichtung von zusätzlichen Gleisstrecken oder Überholgleisen so erhöht werden kann, daß die Gesamtpufferzeit sinkt und der Gesamtbelegungsgrad erhöht werden kann.

Die Matrix $[G]$ der Streckenabschnitte, denen die kürzesten Pufferzeiten zugeordnet sind, hat die gleiche Gestalt, wie die Matrix $[D]$. Das Element g_{ij} gibt den Streckenabschnitt

an, in dem die kürzeste Pufferzeit d_{ij} zwischen Zug i und Zug j beobachtet wird.[1] Man erhält somit die in Tabelle 3-4 wiedergegebene Matrix.

Tabelle 3-4: Matrix der den Streckenabschnitten zugeordneten kürzesten Pufferzeiten

Zug i \ Zug j	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
55	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
56	·	1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
57	·	·	3	4	·	·	·	·	·	·	·	·
58	·	·	·	3	·	·	·	·	·	·	·	·
59	·	·	·	·	2	4	1	·	·	·	·	·
60	·	·	·	·	·	·	3	·	·	·	·	·
61	·	·	·	·	·	·	4	·	·	·	·	·
62	·	·	·	·	·	·	·	5	·	·	·	·
63	·	·	·	·	·	·	·	·	4	5	·	·
64	·	·	·	·	·	·	·	·	·	4	·	·
65	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	4	1
66	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	4

In der Matrix [D] sind nur diejenigen Felder besetzt, die zu zwei aufeinanderfolgenden Zügen gehören. Allen übrigen Feldern wird eine Pufferzeit von unendlich zugeordnet.[2] Für

---

1) Ergibt sich für die kürzeste Pufferzeit in mehreren Streckenabschnitten der gleiche Wert (z.B. $d_{55,56} = 11$ in Abschnitt 1 und Abschnitt 5), so ordnet man ihn zweckmäßigerweise dem ersten dieser Abschnitte zu, da ja bei einer sukzessiven Zusammensetzung der Einzelabschnitte zu einer Gesamtstrecke in Abschnitt 5 keine Verringerung der Pufferzeitsumme (bzw. Erhöhung des Gesamtbelegungsgrades) mehr erzielt wird.

2) Dadurch bleiben Züge, die keinen Nachfolgezug haben, bei der Bestimmung der minimalen Pufferzeitsumme unberücksichtigt.

die praktische Rechnung genügt es jedoch, einen Wert zu nehmen, der größer ist als die Summe aller kürzesten Pufferzeiten. In dem gewählten Beispiel soll daher $d_{ij} = 100$ gesetzt werden für alle Werte von i und j, bei denen Zug j kein Folgezug von Zug i ist. Die Matrix $[D]$ nimmt dann die folgende Gestalt an:

Tabelle 3-5: Korrigierte Matrix der kürzesten Pufferzeiten

Zug i \ Zug j	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
55	11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
56	100	2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
57	100	100	1	9	100	100	100	100	100	100	100	100
58	100	100	100	3	100	100	100	100	100	100	100	100
59	100	100	100	100	2	1	12	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	4	100	100	100	100	100
61	100	100	100	100	100	100	9	100	100	100	100	100
62	100	100	100	100	100	100	100	1	100	100	100	100
63	100	100	100	100	100	100	100	100	0	11	100	100
64	100	100	100	100	100	100	100	100	100	4	100	100
65	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	3	14
66	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	4

Die G e s a m t p u f f e r z e i t zwischen den Zügen i und j werde mit D^*_{ij} bezeichnet. Bei dem vorliegenden Beispiel besteht also das Problem darin, $D^*_{55,67}$ zu bestimmen. Weiterhin sollen die Folge der Streckenabschnitte $\{G^*_{ij}\}$, deren kürzeste Pufferzeiten d_{ij} in die Gesamtpufferzeit $D^*_{55,67}$ eingehen,[1] sowie die Folge der zugehörigen Zugnum-

1) Die Elemente dieser Folge ergeben sich aus den schraffierten Flächen der Pufferzeittabelle auf S.39.

mern[1] $\left\{F^*_{ij}\right\}$ ermittelt werden.

Das Problem wird dadurch gelöst, daß man sukzessive die Gesamtpufferzeiten $D^*_{55,56}$, $D^*_{55,57}$, ..., $D^*_{55,67}$ bestimmt.[2] Setzt man $D^*_{ii} = 0$, dann muß für die Gesamtpufferzeit D^*_{ij} $(j > i)$ gelten

$$D^*_{ij} = \min_k (D^*_{ik} + d_{ik}) \text{ für } i \leq k < j$$

In jedem Schritt erfolgt also die Bestimmung der Gesamtpufferzeit D^*_{ij} mit Hilfe der bereits ermittelten Gesamtpufferzeiten D^*_{ik} $(k < j)$.

Bezeichnet man den das Minimum kennzeichnenden Wert von k mit k*, so erhält man für die Folge der Streckenabschnitte $\left\{G^*_{ij}\right\}$ für $k^* > i$

$$\left\{G^*_{ij}\right\} = \left\{G^*_{ik^*}, g_{k^*j}\right\} \quad \text{und}$$

für $k^* = i$

$$\left\{G^*_{ij}\right\} = \left\{g_{ij}\right\}$$

Analog ergibt sich als Folge der Zugnummern $\left\{F^*_{ij}\right\}$, die in die Bildung der Gesamtpufferzeit zwischen Zug i und Zug j eingehen,
für $k^* > i$

$$\left\{F^*_{ij}\right\} = \left\{F^*_{ik^*};\ j\right\} \quad \text{und}$$

---

1) Die Folge der Zugnummern ist identisch mit der Folge der Knoten, die auf dem "kürzesten Weg" in dem Graph der Pufferzeiten (vgl. Abb. 3-3 auf S.34) liegen.

2) Diese Vorgehensweise ist vergleichbar mit der Methode des dynamischen Programmierens.

für $k^* = i$

$$\left\{F^*_{ij}\right\} = \left\{i,j\right\} .$$

Für das untersuchte Beispiel sollen im folgenden die ersten Schritte durchgeführt werden.

1. Schritt: Bestimmung von $D^*_{55,56}$, $\left\{G^*_{55,56}\right\}$, $\left\{F^*_{55,56}\right\}$

$$j = 56 \; ; \qquad 55 \leq k < 56$$

$$D^*_{55,56} = \min_k \left(D^*_{55,56} + d_{55,56}\right) = 0 + 11 = 11$$

$$\left\{G^*_{55,56}\right\} = \left\{g_{55,56}\right\} = \left\{1\right\}$$

$$\left\{F^*_{55,56}\right\} = \left\{55,56\right\}$$

2. Schritt: Bestimmung von $D^*_{55,57}$, $\left\{G^*_{55,57}\right\}$, $\left\{F^*_{55,57}\right\}$

$$j = 57 \; ; \qquad 55 \leq k < 57$$

$$D^*_{55,57} = \min_k \begin{cases} d_{55,57} = 100 \\ D^*_{55,56} + d_{56,57} = 11 + 2 = 13 \end{cases}$$

Daraus folgt

$$k^* = 56$$

und

$$D^*_{55,57} = 13$$

$$\left\{G^*_{55,57}\right\} = \left\{G^*_{55,56};\, g_{56,57}\right\} = \left\{1,1\right\}$$

$$\left\{F^*_{55,57}\right\} = \left\{F^*_{55,56;57}\right\} = \left\{55,56,57\right\}$$

3. Schritt: Bestimmung von $D^*_{55,58}$, $\left\{G^*_{55,58}\right\}$, $\left\{F^*_{55,58}\right\}$

$j = 58$; $\quad 55 \leq k < 58$

$$D^*_{55,58} = \min_k \begin{cases} d_{55,58} = 100 \\ D^*_{55,56} + d_{56,58} = 11 + 100 = 111 \\ D^*_{55,57} + d_{57,58} = 13 + 1 = 14 \end{cases}$$

Daraus folgt

$k^* = 57$

und

$D^*_{55,58} = 14$

$\left\{G^*_{55,58}\right\} = \left\{G^*_{55,57};\ g_{57,58}\right\} = \left\{1,1,3\right\}$

$\left\{F^*_{55,58}\right\} = \left\{F^*_{55,57;58}\right\} = \left\{55,56,57,58\right\}$

4. Schritt: Bestimmung von $D^*_{55,59}$, $\left\{G^*_{55,59}\right\}$, $\left\{F^*_{55,59}\right\}$

$j = 59$; $\quad 55 \leq k < 59$

$$D^*_{55,59} = \min_k \begin{cases} d_{55,59} = 100 \\ D^*_{55,56} + d_{56,59} = 11 + 100 = 111 \\ D^*_{55,57} + d_{57,59} = 13 + 9 = 22 \\ D^*_{55,58} + d_{58,59} = 14 + 3 = 17 \end{cases}$$

Daraus folgt

$k^* = 58$

und

$D^*_{55,59} = 17$

$\left\{G^*_{55,59}\right\} = \left\{G^*_{55,58};\ g_{58,59}\right\} = \left\{1,1,3,3\right\}$

$\left\{F^*_{55,59}\right\} = \left\{F^*_{55,58;59}\right\} = \left\{55,56,57,58,59\right\}$

Tabelle 3-6: Gesamtpufferzeiten und zugehörige Folgen der Züge und Streckenabschnitte

Nummer des letzten Zuges (j)	Gesamtpufferzeit ($D^*_{55,j}$)	a. = Folge der Züge, die die Gesamtpufferzeit bestimmen $\{F^*_{55,j}\}$ b. = Folge der Streckenabschnitte, auf die sich die Gesamtpufferzeit verteilt $\{G^*_{55,j}\}$
56	11	a. 55 56 b. 1
57	13	a. 55 56 57 b. 1 1
58	14	a. 55 56 57 58 b. 1 1 3
59	17	a. 55 56 57 58 59 b. 1 1 3 3
60	19	a. 55 56 57 58 59 60 b. 1 1 3 3 2
61	18	a. 55 56 57 58 59 61 b. 1 1 3 3 4
62	23	a. 55 56 57 58 59 60 62 b. 1 1 3 3 2 3
63	24	a. 55 56 57 58 59 60 62 63 b. 1 1 3 3 2 3 5
64	24	a. 55 56 57 58 59 60 62 63 64 b. 1 1 3 3 2 3 5 4
65	28	a. 55 56 57 58 59 60 62 63 64 65 b. 1 1 3 3 2 3 5 4 4
66	31	a. 55 56 57 58 59 60 62 63 64 65 66 b. 1 1 3 3 2 3 5 4 4 4
67	35	a. 55 56 57 58 59 60 62 63 64 65 66 67 b. 1 1 3 3 2 3 5 4 4 4 4

Führt man die Berechnung in dieser Art weiter, so erhält man, wie Tabelle 3-6 zeigt, die gleichen Ergebnisse wie beim Graph der Pufferzeiten[1] bzw. der Pufferzeittabelle.[2]

Mit Hilfe des dargestellten Algorithmus kann also die minimale Gesamtpufferzeit ermittelt werden. Nachteilig macht sich besonders bei der Untersuchung längerer Zeiträume der schnell anwachsende Rechenumfang bemerkbar. Da ja für jeden Zug die Gesamtpufferzeiten zu allen Vorzügen berechnet und verglichen werden müssen, kommt man bei n Folgezügen auf $n + (n-1) + \ldots + 1 = \frac{n(n+1)}{2}$ Vergleiche.

Eine Verringerung des Rechenaufwandes ließe sich erreichen, wenn bei jedem einzelnen Zug nur die d i r e k t e n Vorzüge betrachtet werden. Es sei etwa M_j die Menge der direkten Vorzüge des Zuges j. Die Gesamtpufferzeit D^*_{ij} zwischen Anfangszug i und Zug j wäre dann wie folgt zu bestimmen:

$$D^*_{ij} = \min_{k \in M_j} (D^*_{ik} + d_{kj})$$

Eine zweite Möglichkeit, der hier der Vorzug gegeben werden soll, besteht darin, daß man jeweils die Pufferzeit zwischen den Zügen ermittelt, die die gesamte Strecke ohne überholt zu werden durchfahren.

Es seien $q_1, \ldots, q_n$ die durchgehenden Züge, wobei der Anfangszug q_1 und der Endzug q_n ist. Da sämtliche durchgehenden Züge in die Berechnung der Gesamtpufferzeit eingehen,[3] läßt

---

1) Vgl. Abschnitt 3.2.

2) Vgl. Abschnitt 3.4.

3) Sie liegen auf dem kürzesten Weg im Graph der Pufferzeiten (vgl. S.34).

sich die Gesamtpufferzeit zwischen q_1 und q_n aus den Pufferzeiten zwischen jeweils zwei durchfahrenden Zügen zusammensetzen. Es ist

$$D^*_{q_1,q_n} = D^*_{q_1,q_2} + D^*_{q_2,q_3} + \ldots + D^*_{q_{(n-1)},q_n} = \sum_{i=1}^{n-1} D^*_{q_i,q_{i+1}}$$

Analog setzt sich die Folge der Streckenabschnitte und Züge, die bei der Berechnung der Gesamtpufferzeiten herangezogen werden, aus den einzelnen Folgen zusammen. Tabelle 3-7 zeigt, daß sich durch diese Modifizierung des Algorithmus' der Rechenumfang verringern und die Übersichtlichkeit erhöhen läßt.

Tabelle 3-7: Gesamtpufferzeiten zwischen n durchgehenden Zügen des untersuchten Beispiels

Nr. (i)	1. durchgehender Zug (q_i)	2. durchgehender Zug (q_{i+1})	Gesamtpufferzeit ($D^*_{q_i,q_{i+1}}$)	kumulierte Gesamtpufferzeit $\sum_{i=1}^{n-1} D^*_{q_i,q_{i+1}}$	a.=Zugfolge b.=Folge der Abschnitte
1	55	56	11	11	a. 55 56 b. 1
2	56	57	2	13	a. 56 57 b. 1
3	57	59	4	17	a. 57 58 59 b. 3 3
4	59	62	6	23	a. 59 60 62 b. 2 4
5	62	63	1	24	a. 62 63 b. 5
6	63	65	4	28	a. 63 64 65 b. 4 4
7	65	67	7	35	a. 65 66 67 b. 4 4

4 ANWENDUNG DES THEORETISCHEN MODELLS AUF EIN PRAKTISCHES BEISPIEL

4.1 Streckencharakteristik

Zur Überprüfung des theoretischen Modells zur Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades am Beispiel einer ausgewählten Strecke aus dem Netz der Deutschen Bundesbahn wurde der Bildfahrplan dieser Strecke für einen Beobachtungszeitraum von 24 Stunden herangezogen.

Die Strecke AF[1)] mit einer Gesamtlänge von 31.1 km ist unterteilt in 5 Streckenabschnitte. Charakteristische Merkmale der Einzelabschnitte sind in Tabelle 4-1 zusammengefaßt.

Tabelle 4-1: Charakteristische Merkmale der untersuchten Strecke AF

Lfd. Nr. des Abschnitts (k)	Bezeichnung des Abschnitts	Länge des Abschnitts (km)	Anzahl der Blockabschnitte (m)
1	AB	6.0	3
2	BC	3.8	2
3	CD	6.1	3
4	DE	6.5	3
5	EF	8.7	4

1) Bei der Bezeichnung der Streckenabschnitte ist eine Beschränkung auf allgemeine Symbole notwendig, da Bildfahrpläne zu dem nicht für "Dritte" bestimmten Datenmaterial der Deutschen Bundesbahn gehören (vgl. S.5).

Auf der zweigleisigen Strecke steht sowohl den Zügen, die in der Richtung von A nach F verkehren als auch den Zügen der Gegenrichtung jeweils ein Gleis zur Verfügung. Überholstellen sind in Richtung von A nach F im Bahnhof D und E und in der Richtung von F nach A in den Bahnhöfen D und B gegeben.

Fahrtverzögerungen durch Steigungen, Langsamfahrstellen usw. üben insofern keinen Einfluß aus, als in die Formeln für die Berechnung der kürzesten Zugfolgezeiten (2.14), (2.15) und (2.16) nur die dem Bildfahrplan entnommenen reinen Fahrzeiten für die einzelnen Streckenabschnitte eingehen.

Das Beispiel wurde zunächst nur für die Richtung AF durchgerechnet. Um Aussagen über die Gegenrichtung oder andere Strecken treffen zu können, genügt die Eingabe des jeweiligen streckenspezifischen Datenmaterials.

4.2 Datenmaterial

4.2.1 Gewinnung des Datenmaterials

Das benötigte Datenmaterial wird entnommen aus B i l d f a h r p l a n und S t r e c k e n b a n d der zu untersuchenden Strecke.

Der Bildfahrplan liefert folgende Daten:

1. Fahrzeiten der einzelnen Züge zwischen den Fahrzeitmeßpunkten[1)]

---

1) Für das Beispiel die Bahnhöfe A, B, C, D, E und F.

2. Gattung der Züge
3. Reihenfolge der Zugfahrten im Beobachtungszeitraum
4. Fahrplanbedingte Haltepunkte und Überholvorgänge.

Das Streckenband stellt eine detaillierte Streckenbeschreibung dar, insbesondere in Hinsicht auf die Entfernungen der einzelnen Bezugspunkte voneinander. Außerdem enthält es (für die vorliegende Arbeit nicht benötigte) Informationen darüber, welche Geschwindigkeiten in bestimmten Streckenbereichen gefahren werden dürfen, wo zusätzliche Gleise vorhanden sind, wo Steigungen, Signalstandorte, Bahnhöfe usw. zu finden sind.

Somit können dem Streckenband die für die Untersuchung benötigten Angaben über

1. Lage der Bahnhöfe[1)]
2. Signalstandorte (einschließlich Vorsignale)

entnommen werden.

4.2.2 Datenaufbereitung

Für jede Zugfahrt, die ohne Überholung stattfindet, wird anhand der Angaben im Bildfahrplan eine Lochkarte angelegt. Auf der Lochkarte werden vermerkt:

1. Die Streckenabschnitte, die von den jeweiligen Zügen durchfahren werden, ohne überholt zu werden.[2)]
2. Die Abfahrts- und Ankunftszeiten[3)] in jedem Streckenabschnitt

---

1) Diese Information ist allerdings auch dem sog. "Bildfahrplankopf" zu entnehmen.

2) Überholte Züge erhalten dadurch verschiedene Zuglaufnummern (vgl. Fußnote 1 auf S.23 dieser Arbeit).

3) Bei nicht haltenden Zügen die "Durchfahrtszeiten".

3. Haltegewohnheiten[1)]
4. Art des Zuges (Reise- oder Güterzug)
5. Zugnummer.

Aus diesen Angaben ergibt sich der in Tabelle 4-2 abgebildete Fahrplan für die untersuchte Strecke. Die Zuglaufnummern werden den einzelnen Zügen beim Einlesen der Datenkarten zugeordnet.

Mit Hilfe des aufbereiteten Datenmaterials läßt sich der Belegungsgrad für die einzelnen Streckenabschnitte und für die Gesamtstrecke ermitteln. Dazu wurde aufbauend auf dem oben beschriebenen Algorithmus ein Programm in der Programmiersprache FORTRAN IV entwickelt.

4.3 Programmbeschreibung

Nach dem Einlesen des Datenmaterials wird im ersten Unterprogramm die von jedem Zug in den einzelnen Abschnitten benötigte Fahrzeit ermittelt. Weiter werden für jeden Streckenabschnitt die Bedienungszeiten im Ausgangsbahnhof für nicht anhaltende Züge berechnet.[2)]

---

1) Die auf der ausgewählten Strecke verkehrenden Züge konnten hinsichtlich ihrer Haltepunkte in drei Klassen eingeteilt werden:
   1. Züge, die ohne anzuhalten vom Bahnhof A bis Bahnhof F fahren.
   2. Züge, die in jedem Bahnhof halten.
   3. Züge, die nur in Bahnhof D halten.

2) Vgl. Abbildung 2-5 auf S.17 dieser Arbeit.

TABELLE 6-2: ABFAHRT UND ANKUNFT IN DEN EINZELNEN STRECKENABSCHNITTEN UEBER DEN GESAMTEN TAG (FAHRT N = 139 EJECT)

ZUG-NR	ABSCHNITT 1		ABSCHNITT 2		ABSCHNITT 3		ABSCHNITT 4		ABSCHNITT 5		BEMERKUNGEN	
	AB	AN	AB	AN	AB	AN	AB	AN	AB	AN	ZUGART	HALTEPUNKT
1	0.00	0.11	0.11	0.13	0.13	0.16	0.16	0.19	0.19	0.25	PERSZUG	HARLT NICHT AN
2			0.17	0.20	0.20	0.25	0.25	0.30			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
3	0.23	0.28	0.28	0.30	0.30	0.33	0.33	0.36	0.36	0.41	PERSZUG	HARLT NICHT AN
4			0.31	0.36	0.36	0.42	0.42	0.49			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
5	0.53	0.57	0.58	1.02	1.02	1.07	1.08	1.12	1.13	1.20	PERSZUG	HARLT UEBERALL
6	1.06	1.12	1.12	1.14	1.14	1.18	1.18	1.22	1.22	1.28	PERSZUG	HARLT NICHT AN
7	1.14	1.19	1.19	1.20	1.20	1.24	1.24	1.27	1.27	1.33	PERSZUG	HARLT NICHT AN
8	1.17	1.23	1.23	1.25	1.25	1.28	1.28	1.32	1.32	1.38	PERSZUG	HARLT NICHT AN
9	1.26	1.32	1.32	1.34	1.34	1.37	1.37	1.41	1.41	1.50	PERSZUG	HARLT NICHT AN
10							1.39	1.48			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
11	1.49	1.57	1.57	1.40	1.40	1.44	1.44	1.49	1.50	1.58	GUETERZUG	HARLT NICHT AN
12			1.58	2.01	2.01	2.06	2.06	2.13			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
13	2.06	2.07	2.07	2.11	2.11	2.16	2.16	2.22			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
14			2.17	2.24	2.24	2.30	2.30	2.38			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
15			2.25	2.27	2.31	2.36					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
16			2.56	3.01	3.01	3.07	3.07	3.16			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
17			3.05	3.10	3.10	3.16	3.16	3.23			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
18							3.43	3.44			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
19	3.35	3.41	3.41	3.44	3.44	3.51	3.51	3.56	3.56	4.03	PERSZUG	HARLT NICHT AN
20	3.50	3.55	3.55	3.59	3.59	4.04	4.04	4.12	4.13	4.20	PERSZUG	HARLT UEBERALL
21			4.04	4.09	4.09	4.16					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
22			4.13	4.18	4.18	4.24	4.24	4.32			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
23			4.28	4.33	4.33	4.38	4.38	4.44			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
24			4.37	4.42	4.42	4.49					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
25							4.41	4.51			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
26	4.44	4.47	4.48	4.50	4.50	4.54	4.54	4.58	4.59	5.05	GUETERZUG	HARLT NUR IN D
27							5.01	5.11			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
28			4.56	5.01	5.01	5.07	5.07	5.15			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
29	5.01	5.06	5.06	5.09	5.09	5.14	5.14	5.20	5.21	5.28	PERSZUG	HARLT UEBERALL
30	5.04	5.11	5.11	5.14	5.14	5.20	5.25	5.31	5.31	5.41	GUETERZUG	HARLT NUR IN D
31			5.26	5.32	5.32	5.42					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
32							5.32	5.46			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
33	5.38	5.42	5.43	5.46	5.47	5.53	5.50	6.01	6.02	6.09	PERSZUG	HARLT UEBERALL
34			5.50	5.55	5.55	6.02					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
35	6.08	6.12	6.13	6.16	6.16	6.22	6.23	6.27	6.28	6.36	PERSZUG	HARLT UEBERALL
36							6.26	6.35			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
37	6.33	6.37	6.38	6.41	6.42	6.48	6.48	6.55	6.57	7.05	PERSZUG	HARLT UEBERALL
38	6.58	7.02	7.03	7.06	7.07	7.12	7.13	7.18	7.19	7.25	PERSZUG	HARLT UEBERALL
39	7.12	7.16	7.16	7.19	7.19	7.24	7.24	7.28	7.29	7.35	PERSZUG	HARLT NICHT AN
40	7.17	7.21	7.21	7.23	7.23	7.28	7.34	7.40	7.36	7.40	PERSZUG	HARLT NUR IN D
41	7.27	7.32	7.32	7.34	7.34	7.37	7.37	7.40	7.40	7.47	PERSZUG	HARLT NICHT AN
42	7.30	7.36	7.35	7.38	7.38	7.44	7.44	7.49	7.49	7.56	PERSZUG	HARLT UEBERALL
43	7.43	7.48	7.48	7.49	7.49	7.52	7.52	7.58	7.55	8.06	PERSZUG	HARLT UEBERALL
44			7.51	7.56	7.56	8.02	8.02	8.10			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
45	7.56	8.00	8.01	8.06	8.06	8.12	8.13	8.17	8.18	8.25	PERSZUG	HARLT UEBERALL
46			8.06	8.10	8.10	8.18					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
47	8.15	8.19	8.19	8.21	8.21	8.23	8.23	8.26	8.26	8.32	PERSZUG	HARLT NICHT AN
48	8.18	8.23	8.23	8.25	8.25	8.27	8.27	8.30	8.30	8.35	PERSZUG	HARLT NICHT AN
49	8.38	8.42	8.43	8.46	8.46	8.47	8.47	8.50	8.50	8.56	PERSZUG	HARLT NICHT AN
50	8.42	8.46	8.46	8.48	8.48	8.51	8.51	8.54	8.54	9.01	PERSZUG	HARLT NICHT AN
51			9.00	9.05	9.05	9.11	9.11	9.18			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
52	9.21	9.26	9.26	9.28	9.28	9.31	9.31	9.34	9.34	9.41	PERSZUG	HARLT NICHT AN
53			9.31	9.38	9.38	9.41	9.41	9.50			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
54	9.41	9.45	9.46	9.49	9.50	9.56	9.57	10.01	10.02	10.08	PERSZUG	HARLT UEBERALL
55	10.00	10.05	10.05	10.08	10.08	10.09	10.09	10.12	10.12	10.18	PERSZUG	HARLT NICHT AN
56	10.15	10.20	10.20	10.21	10.21	10.24	10.24	10.27	10.27	10.33	PERSZUG	HARLT NICHT AN
57	10.21	10.25	10.25	10.27	10.27	10.31	10.31	10.35	10.35	10.40	PERSZUG	HARLT NICHT AN
58					10.31	10.38					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
59	10.34	10.38	10.38	10.40	10.40	10.43	10.43	10.47	10.47	10.54	PERSZUG	HARLT NICHT AN
60			10.42	10.47	10.47	10.55					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
61							10.47	10.57			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
62	10.49	10.53	10.54	10.57	10.57	11.03	11.04	11.09	11.09	11.18	REISEZUG	HARLT UEBERALL
63	11.03	11.07	11.07	11.09	11.09	11.12	11.12	11.15	11.15	11.21	REISEZUG	HARLT NICHT AN
64							11.14	11.24			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
65	11.16	11.23	11.23	11.24	11.24	11.27	11.27	11.30	11.30	11.35	REISEZUG	HARLT NICHT AN
66							11.32	11.42			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
67	11.36	11.41	11.41	11.42	11.42	11.45	11.45	11.48	11.48	11.54	REISEZUG	HARLT NICHT AN
68	11.43	11.48	11.48	11.49	11.49	11.52	11.52	11.55	11.55	12.01	REISEZUG	HARLT NICHT AN
69	11.49	11.54	11.54	11.56	11.56	11.59	11.59	12.02	12.02	12.08	REISEZUG	HARLT NICHT AN
70	12.04	12.09	12.09	12.10	12.10	12.13	12.13	12.16	12.16	12.21	REISEZUG	HARLT NICHT AN
71	12.16	12.20	12.21	12.24	12.24	12.30	12.30	12.35	12.36	12.42	REISEZUG	HARLT UEBERALL
72			12.26	12.29	12.29	12.35	12.38	12.48			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
73			12.34	12.39	12.39	12.45					GUETERZUG	HARLT NICHT AN
74	12.51	12.55	12.55	12.57	12.57	13.00	13.00	13.04	13.04	13.09	REISEZUG	HARLT NICHT AN
75	13.04	13.09	13.09	13.12	13.12	13.18	13.19	13.24	13.24	13.31	REISEZUG	HARLT UEBERALL
76	13.23	13.27	13.27	13.29	13.29	13.33	13.33	13.37	13.37	13.43	REISEZUG	HARLT NUR IN D
77	13.28	13.33	13.33	13.35	13.35	13.38	13.38	13.42	13.42	13.47	REISEZUG	HARLT NICHT AN
78							13.41	13.52			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
79	13.40	13.44	13.45	13.48	13.48	13.54	13.55	13.59	14.00	14.06	REISEZUG	HARLT UEBERALL
80	13.55	14.00	14.00	14.02	14.02	14.06	14.06	14.09	14.07	14.13	REISEZUG	HARLT NICHT AN
81	14.00	14.04	14.05	14.08	14.08	14.14	14.15	14.19	14.20	14.26	REISEZUG	HARLT UEBERALL
82	14.15	14.19	14.19	14.20	14.20	14.22	14.22	14.25	14.25	14.31	REISEZUG	HARLT NICHT AN
83			14.23	14.27	14.27	14.33	14.33	14.40			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
84	14.35	14.40	14.40	14.41	14.41	14.45	14.45	14.48	14.48	14.54	REISEZUG	HARLT UEBERALL
85	14.45	14.50	14.50	14.54	14.54	15.00	15.01	15.06	15.06	15.13	REISEZUG	HARLT UEBERALL
86	14.57	15.01	15.01	15.03	15.03	15.08	15.08	15.10	15.10	15.17	REISEZUG	HARLT NICHT AN
87	15.01	15.05	15.05	15.08	15.08	15.12	15.17	15.21	15.21	15.28	REISEZUG	HARLT NUR IN D
88			15.10	15.16	15.16	15.23	15.23	15.30			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
89	15.19	15.23	15.25	15.26	15.26	15.33	15.33	15.37	15.38	15.45	REISEZUG	HARLT UEBERALL
90	15.32	15.36	15.36	15.38	15.38	15.42	15.43	15.47	15.47	15.53	REISEZUG	HARLT NUR IN D
91	15.46	15.48	15.48	15.51	15.51	15.58	15.58	16.01			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
92	15.58	16.03	16.03	16.07	16.07	16.13	16.13	16.18	16.21	16.28	REISEZUG	HARLT UEBERALL
93			16.09	16.13	16.13	16.19	16.19	16.27			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
94	16.34	16.38	16.39	16.40	16.40	16.46	16.46	16.51	16.51	16.58	REISEZUG	HARLT NUR IN D
95	16.38	16.42	16.43	16.46	16.46	16.52	16.53	16.57	16.58	17.06	REISEZUG	HARLT UEBERALL
96	16.56	17.00	17.01	17.04	17.05	17.11	17.12	17.16	17.17	17.23	REISEZUG	HARLT UEBERALL
97			17.05	17.09	17.09	17.15	17.15	17.22			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
98	17.19	17.24	17.24	17.25	17.25	17.28	17.28	17.30	17.30	17.35	REISEZUG	HARLT NICHT AN
99	17.24	17.28	17.28	17.30	17.30	17.34	17.35	17.38	17.38	17.45	REISEZUG	HARLT NUR IN D
100	17.27	17.31	17.32	17.35	17.35	17.39	17.39	17.43	17.43	17.50	REISEZUG	HARLT UEBERALL
101	17.45	17.45	17.45	17.47	17.47	17.50	17.50	17.53	17.53	17.59	REISEZUG	HARLT NICHT AN
102	17.56	18.00	18.01	18.02	18.02	18.08	18.09	18.13	18.14	18.20	REISEZUG	HARLT UEBERALL
103	18.14	18.18	18.18	18.19	18.19	18.22	18.22	18.25	18.25	18.31	REISEZUG	HARLT NICHT AN
104	18.19	18.23	18.23	18.24	18.24	18.27	18.27	18.30	18.30	18.36	REISEZUG	HARLT NICHT AN
105	18.27	18.31	18.32	18.35	18.35	18.41					REISEZUG	HARLT NICHT AN
106	18.35	18.40	18.40	18.41	18.41	18.44	18.44	18.47	18.47	18.52	REISEZUG	HARLT UEBERALL
107							18.46	18.50	18.51	18.57	REISEZUG	HARLT UEBERALL
108	18.45	18.49	18.49	18.51	18.51	18.54	18.54	18.58	18.58	19.03	REISEZUG	HARLT NICHT AN
109	18.54	18.58	18.59	19.02	19.02	19.06	19.06	19.09	19.14	19.20	REISEZUG	HARLT UEBERALL
110			19.03	19.08	19.08	19.14	19.16	19.21			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
111	19.17	19.21	19.21	19.25	19.25	19.31	19.32	19.36	19.37	19.43	REISEZUG	HARLT UEBERALL
112			19.30	19.38	19.38	19.41	19.41	19.46			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
113	19.46	19.48	19.48	19.50	19.50	19.53	19.53	19.56	19.56	20.03	REISEZUG	HARLT NICHT AN
114	19.54	19.58	19.58	20.00	20.00	20.04	20.04	20.07	20.07	20.13	REISEZUG	HARLT NICHT AN
115							20.06	20.15			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
116	20.04	20.08	20.09	20.11	20.12	20.18	20.19	20.23	20.24	20.30	REISEZUG	HARLT UEBERALL
117	20.17	20.21	20.21	20.22	20.22	20.25	20.25	20.28	20.28	20.35	REISEZUG	HARLT NICHT AN
118			20.28	20.32	20.32	20.38	20.38	20.46			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
119			20.56	21.00	21.00	21.05	21.05	21.12			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
120	21.01	21.07	21.07	21.11	21.11	21.17	21.17	21.24	21.24	21.33	REISEZUG	HARLT NICHT AN
121	21.18	21.24	21.25	21.28	21.28	21.24	21.24	21.29	21.29	21.36	REISEZUG	HARLT UEBERALL
122	21.28	21.32	21.32	21.34	21.34	21.37	21.37	21.41	21.41	21.47	REISEZUG	HARLT NICHT AN
123			21.39	21.46	21.46	21.52	21.52	22.01			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
124	21.49	21.53	21.53	21.56	21.56	21.59	21.59	22.03	22.04	22.10	REISEZUG	HARLT NICHT AN
125			22.04	22.09	22.09	22.15	22.15	22.22			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
126	22.16	22.25	22.27	22.28	22.28	22.34	22.34	22.40	22.40	22.50	GUETERZUG	HARLT NICHT AN
127	22.40	22.45	22.45	22.47	22.47	22.50	22.50	22.53	22.54	23.00	REISEZUG	HARLT UEBERALL
128	22.44	22.48	22.49	22.52	22.52	22.58					REISEZUG	HARLT UEBERALL
129	22.55	22.59	22.59	23.01	23.01	23.04	23.04	23.07	23.07	23.12	REISEZUG	HARLT NICHT AN
130							23.06	23.10	23.11	23.18	REISEZUG	HARLT UEBERALL
131	23.06	23.08	23.08	23.10	23.10	23.13	23.13	23.17	23.17	23.23	REISEZUG	HARLT NICHT AN
132	23.08	23.15	23.15	23.17	23.17	23.21	23.21	23.25	23.25	23.31	GUETERZUG	HARLT NICHT AN
133	23.18	23.22	23.22	23.24	23.24	23.28	23.28	23.31	23.33	23.39	REISEZUG	HARLT UEBERALL
134	23.27	23.31	23.32	23.35	23.35	23.41	23.41	23.45	23.46	23.52	REISEZUG	HARLT UEBERALL
135			23.38	23.40	23.40	23.46	23.46	23.50			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
136	23.42	23.49	23.49	23.51	23.51	23.57	23.57	0.02			GUETERZUG	HARLT NICHT AN
137	23.56	0.0	0.0	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.09	0.15	REISEZUG	HARLT NICHT AN

Mit Hilfe dieser Werte werden im zweiten Unterprogramm die kürzesten Zugfolgezeiten gemäß (2.14), (2.15) und (2.16) ermittelt. Gleichzeitig wird die maßgebliche, d.h. die maximale, kürzeste Zugfolgezeit für jedes Zugpaar bestimmt. Durch Vergleich mit den planmäßigen Zugfolgezeiten sind damit bereits die Pufferzeiten für die einzelnen Streckenabschnitte festgelegt.[1)]

Im nächsten Schritt wird für jede Verknüpfung von einem Vorzug mit einem Nachzug das Minimum der Pufferzeiten in den einzelnen Streckenabschnitten gesucht.[2)]

Damit sind alle den Algorithmus beeinflussenden Größen bestimmt:

i = Vorzug

j = Nachzug

d_{ij} = die kürzeste Pufferzeit zwischen Vorzug i und Nachzug j

g_{ij} = der zu d_{ij} gehörende Streckenabschnitt.

In verschiedenen zusätzlichen Unterprogrammen wird eine statistische Auswertung der Pufferzeiten durchgeführt. Dadurch werden zum Beispiel Aussagen über die Stundenbelegungsgrade oder über die Verteilungsfunktion der Pufferzeiten in den einzelnen Streckenabschnitten ermöglicht.

---

1) Vgl. die Pufferzeiten in der Pufferzeittabelle auf S.39.

2) Das Minimum entspricht den schraffierten Feldern in der Pufferzeittabelle.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Ergebnisse für die Einzelabschnitte

Die Ergebnisse für die Einzelabschnitte sind zu entnehmen aus den Tabellen 4-3, 4-4, 4-5, 4-6 und 4-7.

Die einzelnen Spalten der Tabellen sind wie folgt zu interpretieren:

Spalte 1: Zugnummern, die sich nur auf den jeweiligen Streckenabschnitt beziehen.[1)]

Spalte 2: Zuglaufnummern, die sich auf sämtliche Strekkenabschnitte beziehen.[2)]

Spalte 3: Die Abfahrtszeiten der Züge im Ausgangsbahnhof des Streckenabschnitts.

Spalte 4: Die Ankunftszeiten im Endbahnhof des Streckenabschnitts.

Spalte 5: Die Fahrzeiten der Züge im Streckenabschnitt.

Spalte 6: Die p l a n m ä ß i g e n Zugfolgezeiten Z_F[3)]

Spalte 7: Die maßgeblichen k ü r z e s t e n Zugfolgezeiten c_{min}.[4)]

Spalte 8: Die Pufferzeiten für jeden Zug.

Spalte 9: Die kumulierten Pufferzeiten.

---

1) In jedem Abschnitt gibt es in der Regel eine unterschiedlich große Anzahl von Zugfolgen, für die Pufferzeiten berechnet werden müssen.

2) Ein Vergleich von Pufferzeiten ist nur bei Zugfolgen mit identischen Zuglaufnummern sinnvoll. So folgt z.B. nur im ersten und fünften Abschnitt auf den Zug mit der Laufnummer 3 der Zug mit der Laufnummer 5 . Die minimale Pufferzeit zwischen beiden ist $r_{3,5} = 26$ im Abschnitt 1.

3) Im Streckenabschnitt 1 folgt dem Zug 1 um 0.06 Uhr der Zug 2 um 0.23, so daß sich $Z_F = 17$ ergibt.

4) Hierbei handelt es sich um das Maximum der Zugfolgezeiten in den einzelnen Blockabschnitten. Vgl. dazu Formel (2.17) auf S. 26 dieser Arbeit.

TABELLE 4-3: STRECKENABSCHNITT 1

ZUG	ZUGLAUFNR.	ABFAHRT	ANKUNFT	FAHRZEIT	ZUGFOLGEZEITEN		PUFFERZEIT		BEMERKUNGEN
					Z(F)	C(MIN)	Z(J,K)	SUMP	1 = DURCHFAHRENDER ZUG 2 = ANFAHRENDER ZUG
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.06	0.11	5	17	4	13	13	2
2	3	0.23	0.28	5	30	4	26	39	2
3	5	0.53	0.57	4	13	3	10	49	2
4	6	1.06	1.12	6	8	5	3	52	2
5	7	1.14	1.18	4	5	3	2	54	2
6	8	1.19	1.23	4	7	3	4	58	2
7	9	1.26	1.32	6	4	4	0	58	2
8	11	1.30	1.37	7	32	6	26	84	2
9	13	2.02	2.07	5	93	4	89	173	2
10	19	3.35	3.41	6	15	5	10	183	2
11	20	3.50	3.55	5	54	4	50	233	2
12	26	4.44	4.47	3	17	2	15	248	2
13	29	5.01	5.06	5	3	4	-1	247	2
14	30	5.04	5.11	7	34	6	28	275	2
15	33	5.38	5.42	4	30	3	27	302	2
16	35	6.08	6.12	4	25	3	22	324	2
17	37	6.33	6.37	4	25	3	22	346	2
18	38	6.58	7.02	4	14	3	11	357	2
19	39	7.12	7.16	4	5	3	2	359	2
20	40	7.17	7.21	4	10	3	7	366	2
21	41	7.27	7.32	5	3	4	-1	365	2
22	42	7.30	7.34	4	13	3	10	375	2
23	43	7.43	7.48	5	13	4	9	384	2
24	45	7.56	8.00	4	19	3	16	400	2
25	47	8.15	8.19	4	3	3	0	400	2
26	48	8.18	8.23	5	20	4	16	416	2
27	49	8.38	8.43	5	4	4	0	416	2
28	50	8.42	8.46	4	39	3	36	452	2
29	52	9.21	9.26	5	20	4	16	468	2
30	54	9.41	9.45	4	19	3	16	484	2
31	55	10.00	10.05	5	15	4	11	495	2
32	56	10.15	10.20	5	6	4	2	497	2
33	57	10.21	10.25	4	13	3	10	507	2
34	59	10.34	10.38	4	15	3	12	519	2
35	62	10.49	10.53	4	14	3	11	530	2
36	63	11.03	11.07	4	15	3	12	542	2
37	65	11.18	11.23	5	18	4	14	556	2
38	67	11.36	11.41	5	7	4	3	559	2
39	68	11.43	11.48	5	6	4	2	561	2
40	69	11.49	11.54	5	15	4	11	572	2
41	70	12.04	12.09	5	12	4	8	580	2
42	71	12.16	12.20	4	35	3	32	612	2
43	74	12.51	12.55	4	13	3	10	622	2
44	75	13.04	13.09	5	19	4	15	637	2
45	76	13.23	13.27	4	5	3	2	639	2
46	77	13.28	13.33	5	12	4	8	647	2
47	79	13.40	13.44	4	15	3	12	659	2
48	80	13.55	14.00	5	5	4	1	660	2
49	81	14.00	14.04	4	15	3	12	672	2
50	82	14.15	14.19	4	20	3	17	689	2
51	84	14.35	14.40	5	10	4	6	695	2
52	85	14.45	14.50	5	12	4	8	703	2
53	86	14.57	15.01	4	4	3	1	704	2
54	87	15.01	15.05	4	18	3	15	719	2
55	89	15.19	15.23	4	13	3	10	729	2
56	90	15.32	15.36	4	12	3	9	738	2
57	91	15.44	15.48	4	14	3	11	749	2
58	92	15.58	16.03	5	36	4	32	781	2
59	94	16.34	16.38	4	4	3	1	782	2
60	95	16.38	16.42	4	18	3	15	797	2
61	96	16.56	17.00	4	23	3	20	817	2
62	98	17.19	17.24	5	5	4	1	818	2
63	99	17.24	17.28	4	3	3	0	818	2
64	100	17.27	17.31	4	14	3	11	829	2
65	101	17.41	17.45	4	13	3	10	839	2
66	102	17.54	18.00	6	20	5	15	854	2
67	103	18.14	18.18	4	5	3	2	856	2
68	104	18.19	18.23	4	8	3	5	861	2
69	105	18.27	18.31	4	8	3	5	866	2
70	106	18.35	18.40	5	10	4	6	872	2
71	108	18.45	18.49	4	9	3	6	878	2
72	109	18.54	18.58	4	23	3	20	898	2
73	111	19.17	19.21	4	27	3	24	922	2
74	113	19.44	19.48	4	10	3	7	929	2
75	114	19.54	19.58	4	10	3	7	936	2
76	116	20.04	20.08	4	13	3	10	946	2
77	117	20.17	20.21	4	44	3	41	987	2
78	120	21.01	21.07	6	9	5	4	991	2
79	121	21.10	21.14	4	18	3	15	1006	2
80	122	21.28	21.32	4	21	3	18	1024	2
81	124	21.49	21.53	4	27	3	24	1048	2
82	126	22.16	22.25	9	24	8	16	1064	2
83	127	22.40	22.45	5	4	4	0	1064	2
84	128	22.44	22.48	4	11	3	8	1072	2
85	129	22.55	22.59	4	9	3	6	1078	2
86	131	23.04	23.08	4	4	3	1	1079	2
87	132	23.08	23.15	7	10	5	4	1083	2
88	133	23.18	23.22	4	9	3	6	1089	2
89	134	23.27	23.31	4	15	3	12	1101	2
90	136	23.42	23.49	7	14	6	8	1109	2
91	137	23.56	0.0	4	10	3	7	1116	2
SUMME					1440	324	1116		

TABELLE 4-4: STRECKENABSCHNITT 2

ZUG	ZUGLAUFNR.	ABFAHRT	ANKUNFT	FAHRZEIT	ZUGFOLGEZEITEN		DIFFERENZEN		BEMERKUNGEN
					ZEIT	DIFF	ZEIT	SUMME	1 = DURCHFAHRENDER ZUG 2 = ANFAHRENDER ZUG
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.11	0.13	2	6	3	3	3	1
2	2	0.17	0.20	3	11	3	6	11	2
3	3	0.28	0.30	2	3	3	6	11	1
4	4	0.31	0.36	5	27	5	22	33	2
5	5	0.58	1.02	4	14	4	10	43	2
6	6	1.12	1.14	2	6	2	4	47	1
7	7	1.18	1.20	2	5	2	3	50	1
8	8	1.23	1.25	2	9	2	7	57	1
9	9	1.32	1.34	2	9	2	7	64	1
10	11	1.37	1.40	3	19	4	15	79	1
11	12	1.56	2.01	5	11	5	6	85	2
12	13	2.07	2.11	4	10	4	6	86	1
13	14	2.17	2.24	7	8	7	1	87	2
14	15	2.25	2.31	6	31	6	25	112	2
15	16	2.56	3.01	5	9	5	4	116	2
16	17	3.05	3.10	5	36	5	31	147	2
17	19	3.41	3.44	3	14	4	10	157	1
18	20	3.55	3.59	4	9	4	5	162	2
19	21	4.04	4.09	5	9	5	4	166	2
20	22	4.13	4.18	5	15	5	10	176	2
21	23	4.28	4.33	5	9	5	4	180	2
22	24	4.37	4.42	5	11	5	6	186	2
23	26	4.48	4.50	2	8	3	5	191	1
24	28	4.56	5.01	5	10	5	5	196	2
25	29	5.06	5.09	3	5	3	2	198	2
26	30	5.11	5.14	3	15	4	11	209	1
27	31	5.26	5.32	6	17	6	11	220	2
28	33	5.43	5.46	3	7	4	3	223	2
29	34	5.50	5.55	5	23	5	18	241	2
30	35	6.13	6.16	3	25	4	21	262	2
31	37	6.38	6.41	3	25	4	21	283	2
32	38	7.03	7.06	3	13	3	10	293	2
33	39	7.16	7.19	3	5	3	2	295	1
34	40	7.21	7.23	2	11	2	9	304	1
35	41	7.32	7.34	2	3	3	0	304	1
36	42	7.35	7.38	3	13	3	10	314	2
37	43	7.48	7.49	1	3	2	1	315	1
38	44	7.51	7.56	5	10	5	5	320	2
39	45	8.01	8.06	5	5	5	0	320	2
40	46	8.06	8.10	4	13	4	9	329	2
41	47	8.19	8.21	2	4	2	2	331	1
42	48	8.23	8.25	2	20	2	18	349	1
43	49	8.43	8.44	1	3	2	1	350	1
44	50	8.46	8.48	2	14	3	11	361	1
45	51	9.00	9.05	5	26	5	21	382	2
46	52	9.26	9.28	2	5	3	2	384	1
47	53	9.31	9.35	4	15	4	11	395	2
48	54	9.46	9.49	3	19	3	16	411	2
49	55	10.05	10.06	1	15	1	14	425	1
50	56	10.20	10.21	1	5	2	3	428	1
51	57	10.25	10.27	2	13	2	11	439	1
52	59	10.38	10.40	2	4	3	1	440	1
53	60	10.42	10.47	5	12	5	7	447	2
54	62	10.54	10.57	3	13	3	10	457	2
55	63	11.07	11.09	2	16	2	14	471	1
56	65	11.23	11.24	1	18	1	17	488	1
57	67	11.41	11.42	1	7	1	6	494	1
58	68	11.48	11.49	1	6	2	4	498	1
59	69	11.54	11.56	2	15	2	13	511	1
60	70	12.09	12.10	1	12	2	10	521	1
61	71	12.21	12.24	3	3	4	-1	520	2
62	72	12.24	12.29	5	10	5	5	525	2
63	73	12.34	12.39	5	21	5	16	541	2
64	74	12.55	12.57	2	14	3	11	552	1
65	75	13.09	13.12	3	18	3	15	567	2
66	76	13.27	13.29	2	6	2	4	571	1
67	77	13.33	13.35	2	12	3	9	580	1
68	79	13.45	13.48	3	15	3	12	592	2
69	80	14.00	14.02	2	5	3	2	594	1
70	81	14.05	14.08	3	14	3	11	605	2
71	82	14.19	14.20	1	3	2	1	606	1
72	83	14.22	14.27	5	18	5	13	619	2
73	84	14.40	14.41	1	10	2	8	627	1
74	85	14.50	14.54	4	11	4	7	634	2
75	86	15.01	15.03	2	4	3	1	635	1
76	87	15.05	15.08	3	5	4	1	636	1
77	88	15.10	15.16	6	14	6	8	644	2
78	89	15.24	15.26	2	12	2	10	654	2
79	90	15.36	15.38	2	12	3	9	663	1
80	91	15.48	15.51	3	15	4	11	674	1
81	92	16.03	16.07	4	6	4	2	676	2
82	93	16.09	16.13	4	30	4	26	702	2
83	94	16.39	16.40	1	4	2	2	704	1
84	95	16.43	16.46	3	18	4	14	718	2
85	96	17.01	17.04	3	4	4	0	718	2
86	97	17.05	17.09	4	19	4	15	733	2
87	98	17.24	17.25	1	4	2	2	735	1
88	99	17.28	17.30	2	4	3	1	736	1
89	100	17.32	17.35	3	13	3	10	746	2
90	101	17.45	17.47	2	16	3	13	759	1
91	102	18.01	18.02	1	17	1	16	775	2
92	103	18.18	18.19	1	5	1	4	779	1
93	104	18.23	18.24	1	9	2	7	786	1
94	105	18.32	18.35	3	8	4	4	790	1
95	106	18.40	18.41	1	9	2	7	797	2
96	108	18.49	18.51	2	10	3	7	804	1
97	109	18.59	19.02	3	4	4	0	804	2
98	110	19.03	19.08	5	18	5	13	817	2
99	111	19.21	19.25	4	9	4	5	822	2
100	112	19.30	19.35	5	18	5	13	835	2
101	113	19.48	19.50	2	10	2	8	843	1
102	114	19.58	20.00	2	11	3	8	851	1
103	116	20.09	20.11	2	12	2	10	861	2
104	117	20.21	20.22	1	7	2	5	866	1
105	118	20.28	20.32	4	28	4	24	890	2
106	119	20.56	21.00	4	11	5	6	896	2
107	120	21.07	21.11	4	8	4	4	900	1
108	121	21.15	21.18	3	17	3	14	914	2
109	122	21.32	21.34	2	9	3	6	920	1
110	123	21.41	21.46	5	12	5	7	927	2
111	124	21.53	21.56	3	11	4	7	934	2
112	125	22.04	22.09	5	21	5	16	950	2
113	126	22.25	22.28	3	20	3	17	967	1
114	127	22.45	22.47	2	6	3	3	968	1
115	128	22.49	22.52	3	10	3	7	975	1
116	129	22.59	23.01	2	9	2	7	982	1
117	131	23.08	23.10	2	7	2	5	987	1
118	132	23.15	23.17	2	7	3	4	991	1
119	133	23.22	23.24	2	10	3	7	998	1
120	134	23.32	23.35	3	3	4	-1	997	2
121	135	23.35	23.40	5	14	5	9	1006	2
122	136	23.49	23.51	2	11	3	8	1014	1
123	137	0.0	0.02	2	11	2	9	1023	1
SUMME					1440	417	1023		

TABELLE 4-5: STRECKENABSCHNITT 3

ZUG	ZUGLAUFNR.	ABFAHRT	ANKUNFT	FAHRZEIT	ZUGFOLGEZEITEN Z(F)	ZUGFOLGEZEITEN C(MIN)	PUFFERZEIT R(J,K)	PUFFERZEIT SUMR	BEMERKUNGEN 1 = DURCHFAHRENDER ZUG 2 = ANFAHRENDER ZUG
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.13	0.16	3	7	3	4	4	1
2	2	0.20	0.25	5	10	4	6	10	1
3	3	0.30	0.33	3	8	3	5	15	1
4	4	0.36	0.42	6	26	5	21	36	1
5	5	1.02	1.07	5	12	4	8	42	2
6	6	1.14	1.18	4	6	3	3	45	1
7	7	1.20	1.23	3	5	3	2	47	1
8	8	1.25	1.28	3	9	3	6	53	1
9	9	1.34	1.37	3	6	3	3	56	1
10	11	1.40	1.46	4	21	4	17	73	1
11	12	2.01	2.06	5	10	4	6	79	1
12	13	2.11	2.16	5	13	4	9	88	1
13	14	2.24	2.30	6	7	5	2	90	1
14	15	2.31	2.38	7	30	5	25	115	1
15	16	3.01	3.07	6	9	5	4	119	1
16	17	3.10	3.16	6	34	5	29	148	1
17	19	3.44	3.51	7	15	5	10	158	1
18	20	3.59	4.06	7	10	5	5	163	2
19	21	4.09	4.16	7	9	5	4	167	1
20	22	4.18	4.24	6	15	5	10	177	1
21	23	4.33	4.38	5	9	4	5	182	1
22	24	4.42	4.49	7	8	5	3	185	1
23	26	4.50	4.54	4	11	4	7	192	1
24	28	5.01	5.07	6	8	5	3	195	1
25	29	5.09	5.16	7	5	5	0	195	2
26	30	5.14	5.20	6	18	5	13	208	1
27	31	5.32	5.42	10	15	8	7	215	1
28	33	5.47	5.53	6	8	5	3	218	2
29	34	5.55	6.02	7	21	5	16	234	1
30	35	6.16	6.22	6	26	5	21	255	2
31	37	6.42	6.48	6	25	5	20	275	2
32	38	7.07	7.12	5	12	4	8	283	2
33	39	7.19	7.24	5	4	4	0	283	1
34	40	7.23	7.28	5	11	4	7	290	1
35	41	7.34	7.37	3	4	3	1	291	1
36	42	7.38	7.44	6	11	5	6	297	2
37	43	7.49	7.52	3	7	3	4	301	1
38	44	7.56	8.02	6	10	5	5	306	1
39	45	8.06	8.12	6	4	5	-1	305	2
40	46	8.10	8.18	8	11	7	4	309	1
41	47	8.21	8.23	2	4	2	2	311	1
42	48	8.25	8.27	2	19	2	17	328	1
43	49	8.44	8.47	3	4	3	1	329	1
44	50	8.48	8.51	3	17	3	14	343	1
45	51	9.05	9.11	6	23	5	18	361	1
46	52	9.28	9.31	3	7	3	4	365	1
47	53	9.35	9.41	6	15	5	10	375	1
48	54	9.50	9.56	6	16	5	11	386	2
49	55	10.06	10.09	3	15	3	12	398	1
50	56	10.21	10.24	3	6	3	3	401	1
51	57	10.27	10.31	4	4	4	0	401	1
52	58	10.31	10.38	7	9	6	3	404	2
53	59	10.40	10.43	3	7	3	4	408	1
54	60	10.47	10.55	8	10	6	4	412	1
55	62	10.57	11.03	6	12	5	7	419	2
56	63	11.09	11.12	3	15	3	12	431	1
57	65	11.24	11.27	3	18	3	15	446	1
58	67	11.42	11.45	3	7	3	4	450	1
59	68	11.49	11.52	3	7	3	4	454	1
60	69	11.56	11.59	3	14	3	11	465	1
61	70	12.10	12.13	3	14	3	11	476	1
62	71	12.24	12.30	6	5	5	0	476	2
63	72	12.29	12.35	6	10	5	5	481	1
64	73	12.39	12.45	6	18	5	13	494	1
65	74	12.57	13.00	3	15	3	12	506	1
66	75	13.12	13.16	6	17	4	13	519	2
67	76	13.29	13.33	4	6	3	3	522	1
68	77	13.35	13.38	3	13	3	10	532	1
69	79	13.48	13.54	6	14	5	9	541	2
70	80	14.02	14.04	2	6	3	3	544	1
71	81	14.08	14.14	6	12	5	7	551	2
72	82	14.20	14.22	2	7	2	5	556	1
73	83	14.27	14.33	6	14	5	9	565	1
74	84	14.41	14.45	4	13	4	9	574	1
75	85	14.54	15.00	6	9	5	4	578	2
76	86	15.03	15.06	3	5	3	2	580	1
77	87	15.08	15.12	4	8	4	4	584	1
78	88	15.16	15.23	7	10	5	5	589	1
79	89	15.26	15.33	7	12	5	7	596	2
80	90	15.38	15.42	4	13	3	10	606	1
81	91	15.51	15.55	4	16	4	12	618	1
82	92	16.07	16.13	6	6	5	1	619	2
83	93	16.13	16.19	6	27	5	22	641	1
84	94	16.40	16.46	6	6	5	1	642	1
85	95	16.46	16.52	6	19	5	14	656	2
86	96	17.05	17.11	6	4	5	-1	655	2
87	97	17.09	17.15	6	16	5	11	666	1
88	98	17.25	17.28	3	5	3	2	668	1
89	99	17.30	17.34	4	5	4	1	669	1
90	100	17.35	17.41	6	12	5	7	676	2
91	101	17.47	17.50	3	15	3	12	688	1
92	102	18.02	18.08	6	17	5	12	700	2
93	103	18.19	18.22	3	5	3	2	702	1
94	104	18.24	18.27	3	11	3	8	710	1
95	105	18.35	18.41	6	6	5	1	711	1
96	106	18.41	18.44	3	10	3	7	718	2
97	108	18.51	18.54	3	11	3	8	726	1
98	109	19.02	19.08	6	6	5	1	727	2
99	110	19.08	19.14	6	17	5	12	739	1
100	111	19.25	19.31	6	10	5	5	744	2
101	112	19.35	19.41	6	15	5	10	754	1
102	113	19.50	19.53	3	10	3	7	761	1
103	114	20.00	20.04	4	12	4	8	769	1
104	116	20.12	20.18	6	10	5	5	774	2
105	117	20.22	20.25	3	10	3	7	781	1
106	118	20.32	20.38	6	28	5	23	804	1
107	119	21.00	21.05	5	11	4	7	811	1
108	120	21.11	21.17	6	7	5	2	813	1
109	121	21.18	21.24	6	16	5	11	824	2
110	122	21.34	21.37	3	12	3	9	833	1
111	123	21.46	21.52	6	10	5	5	838	1
112	124	21.56	21.59	3	13	3	10	848	1
113	125	22.09	22.15	6	19	5	14	862	1
114	126	22.28	22.34	6	19	5	14	876	1
115	127	22.47	22.50	3	5	3	2	878	1
116	128	22.52	22.58	6	9	5	4	882	2
117	129	23.01	23.04	3	9	3	6	888	1
118	131	23.10	23.13	3	7	3	4	892	1
119	132	23.17	23.21	4	7	3	4	896	1
120	133	23.24	23.28	4	11	4	7	903	1
121	134	23.35	23.41	6	5	5	0	903	2
122	135	23.40	23.46	6	11	5	6	909	1
123	136	23.51	23.57	6	11	5	6	915	1
124	137	0.02	0.05	3	11	2	9	924	1
SUMME					1440	516	924		

TABELLE ZUR STRECKENANSCHNITT A

ZUG	ZUGLAUFNR.	ABFAHRT	ANKUNFT	FAHRZEIT	ZUGLAUFZEIT		[illegible]		[illegible]
					Z(F)	Z(ANK)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.16	0.19	3	9	3	A	A	1
2	2	0.25	0.30	5	A	4	4	10	1
3	3	0.33	0.36	3	4	4	5	15	1
4	4	0.42	0.49	7	26	6	20	35	1
5	5	1.08	1.12	4	10	3	7	42	1
6	6	1.18	1.22	4	5	3	2	44	1
7	7	1.23	1.27	4	5	3	2	46	1
8	8	1.28	1.32	4	9	3	6	52	1
9	9	1.37	1.41	4	2	3	-1	51	1
10	10	1.39	1.48	9	5	7	-2	49	1
11	11	1.44	1.50	6	22	5	17	66	1
12	12	2.06	2.13	7	10	6	4	70	1
13	13	2.16	2.22	6	14	5	9	79	1
14	14	2.30	2.38	8	37	6	31	110	1
15	16	3.07	3.14	7	9	6	3	113	1
16	17	3.16	3.23	7	17	5	12	125	1
17	18	3.33	3.44	11	18	9	9	134	1
18	19	3.51	3.56	5	16	4	12	146	1
19	20	4.07	4.12	5	17	5	12	158	2
20	82	4.24	4.32	8	14	6	8	166	1
21	23	4.38	4.44	6	3	4	-1	165	1
22	25	4.41	4.51	10	14	8	6	171	2
23	26	4.55	4.59	4	6	3	3	174	2
24	27	5.01	5.11	10	6	8	-2	172	2
25	28	5.07	5.15	8	9	7	2	174	1
26	29	5.16	5.20	4	9	3	6	180	2
27	30	5.25	5.31	6	7	4	3	183	2
28	32	5.32	5.44	12	24	10	14	197	2
29	33	5.56	6.01	5	27	4	23	220	2
30	35	6.23	6.27	4	3	3	0	220	2
31	36	6.26	6.35	9	22	8	14	234	2
32	37	6.48	6.52	4	25	3	22	256	2
33	38	7.13	7.18	5	11	4	7	263	2
34	39	7.24	7.28	4	6	3	3	266	1
35	40	7.30	7.34	4	7	3	4	270	2
36	41	7.37	7.40	3	7	3	4	274	1
37	42	7.44	7.49	5	8	4	4	278	2
38	43	7.52	7.55	3	10	4	6	284	1
39	44	8.02	8.10	8	11	7	4	288	1
40	45	8.13	8.17	4	10	3	7	295	2
41	47	8.23	8.26	3	4	3	1	296	1
42	48	8.27	8.30	3	20	3	17	313	1
43	49	8.47	8.50	3	4	3	1	314	1
44	50	8.51	8.54	3	20	4	16	330	1
45	51	9.11	9.18	7	20	6	14	344	1
46	52	9.31	9.34	3	10	4	6	350	1
47	53	9.41	9.50	9	16	8	8	358	1
48	54	9.57	10.01	4	12	3	9	367	2
49	55	10.09	10.12	3	15	3	12	379	1
[illegible]	56	10.24	10.27	3	7	3	4	383	1
51	57	10.31	10.35	4	12	3	9	392	1
52	59	10.43	10.47	4	4	3	1	393	1
53	61	10.47	10.57	10	17	8	9	402	2
54	62	11.04	11.09	5	8	4	4	406	2
55	63	11.12	11.15	3	2	3	-1	405	1
56	64	11.14	11.24	10	13	9	4	409	2
57	65	11.27	11.30	3	5	3	2	411	1
[illegible]	66	11.32	11.42	10	13	9	4	415	2
59	67	11.45	11.48	3	7	3	4	419	1
60	68	11.52	11.55	3	7	3	4	423	1
61	69	11.59	12.02	3	14	3	11	434	1
[illegible]	70	12.13	12.16	3	17	3	14	448	1
63	71	12.30	12.35	5	5	5	0	448	2
64	72	12.35	12.43	8	25	7	18	466	1
65	74	13.00	13.04	4	19	3	16	482	1
66	75	13.19	13.24	5	14	4	10	492	2
67	76	13.33	13.37	4	5	3	2	494	2
68	77	13.38	13.42	4	3	3	0	494	1
69	78	13.41	13.52	11	14	9	5	499	2
70	79	13.55	13.59	4	9	3	6	505	2
71	80	14.04	14.07	3	11	3	8	513	1
72	81	14.15	14.19	4	7	3	4	517	2
73	82	14.22	14.25	3	11	4	7	524	1
74	83	14.33	14.40	7	12	6	6	530	1
75	84	14.45	14.48	3	16	3	13	543	1
76	85	15.01	15.06	5	5	4	1	544	2
77	86	15.06	15.10	4	11	3	8	552	1
78	87	15.17	15.21	4	6	4	2	554	2
79	88	15.23	15.30	7	10	6	4	558	1
80	89	15.33	15.38	5	10	4	6	564	2
81	90	15.43	15.47	4	12	4	8	572	2
82	91	15.55	16.01	6	21	5	16	588	1
83	92	16.16	16.21	5	3	5	-2	586	2
84	93	16.19	16.27	8	28	7	21	607	1
85	94	16.47	16.51	4	6	3	3	610	2
86	95	16.53	16.57	4	19	3	16	626	2
87	96	17.12	17.16	4	3	4	-1	625	2
88	97	17.15	17.23	8	13	7	6	631	1
89	98	17.28	17.30	2	7	2	5	636	1
90	99	17.35	17.38	3	6	3	3	639	2
91	100	17.41	17.46	5	9	4	5	644	2
92	101	17.50	17.53	3	19	3	16	660	1
93	102	18.09	18.13	4	13	3	10	670	2
94	103	18.22	18.25	3	5	3	2	672	1
95	104	18.27	18.30	3	17	3	14	686	1
96	106	18.44	18.47	3	2	3	-1	685	2
97	107	18.46	18.50	4	8	3	5	690	2
98	108	18.54	18.58	4	15	3	12	702	1
99	109	19.09	19.13	4	5	4	1	703	2
100	110	19.14	19.21	7	18	6	12	715	1
101	111	19.32	19.36	4	9	4	5	720	2
102	112	19.41	19.49	8	12	7	5	725	1
103	113	19.53	19.56	3	11	3	8	733	1
104	114	20.04	20.07	3	2	3	-1	732	1
105	115	20.06	20.15	9	13	8	5	737	2
106	116	20.19	20.23	4	8	3	7	740	2
107	117	20.25	20.28	3	13	4	9	749	1
108	118	20.38	20.46	8	27	6	21	770	1
109	119	21.05	21.12	7	12	6	6	776	1
110	120	21.17	21.24	7	7	6	1	777	1
111	121	21.24	21.29	5	13	4	9	786	2
112	122	21.37	21.41	4	15	4	11	797	1
113	123	21.52	21.59	7	7	6	1	798	1
114	124	21.59	22.03	4	16	4	12	810	1
115	125	22.15	22.22	7	19	6	13	823	1
116	126	22.34	22.40	6	16	5	11	834	1
117	127	22.50	22.53	3	14	3	11	845	1
118	129	23.04	23.07	3	2	3	-1	844	1
119	130	23.06	23.10	4	7	3	4	848	2
120	131	23.13	23.17	4	8	4	4	852	1
121	132	23.21	23.28	7	7	6	1	853	1
122	133	23.28	23.33	5	13	4	9	862	1
123	134	23.41	23.45	4	5	5	0	862	2
124	135	23.46	23.55	9	11	7	4	866	1
125	136	23.57	0.02	5	4	4	0	870	1
126	137	0.05	0.08	3	11	3	8	878	1
SUMME					1440	562	878		

TABELLE 4-7: STRECKENABSCHNITT 5

ZUG	ZUGLAUFNR.	ABFAHRT	ANKUNFT	FAHRZEIT	ZUGFOLGEZEITEN		PUFFERZEIT		BEMERKUNGEN
					Z(F)	Z(N)	R(J,K)	SUMR	1 = DURCHFAHRENDER ZUG 2 = ANFAHRENDER ZUG
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.19	0.25	6	17	4	13	13	1
2	3	0.36	0.43	7	37	5	32	45	1
3	5	1.13	1.20	7	9	5	4	49	2
4	6	1.22	1.28	6	5	4	1	50	1
5	7	1.27	1.33	6	5	4	1	51	1
6	8	1.32	1.38	6	9	4	5	56	1
7	9	1.41	1.50	9	9	6	3	59	1
8	11	1.50	1.58	8	126	6	120	179	1
9	19	3.56	4.03	7	17	5	12	191	1
10	20	4.13	4.20	7	46	5	41	232	2
11	26	4.59	5.05	6	22	4	18	250	1
12	29	5.21	5.28	7	10	4	6	256	2
13	30	5.31	5.41	10	31	7	24	280	1
14	33	6.02	6.09	7	26	5	21	301	2
15	35	6.28	6.34	6	25	4	21	322	2
16	37	6.53	7.00	7	26	5	21	343	2
17	38	7.19	7.25	6	9	4	5	348	2
18	39	7.28	7.35	7	6	5	1	349	1
19	40	7.34	7.40	6	6	4	2	351	1
20	41	7.40	7.47	7	9	5	4	355	1
21	42	7.49	7.56	7	6	5	1	356	2
22	43	7.55	8.04	9	23	6	17	373	1
23	45	8.18	8.25	7	8	5	3	376	2
24	47	8.26	8.32	6	4	4	0	376	1
25	48	8.30	8.35	5	20	3	17	393	1
26	49	8.50	8.56	6	4	4	0	393	1
27	50	8.54	9.01	7	40	5	35	428	1
28	52	9.34	9.41	7	28	5	23	451	1
29	54	10.02	10.08	6	10	4	6	457	2
30	55	10.12	10.18	6	15	4	11	468	1
31	56	10.27	10.33	6	8	4	4	472	1
32	57	10.35	10.40	5	12	3	9	481	1
33	59	10.47	10.54	7	22	5	17	498	1
34	62	11.09	11.16	7	6	5	1	499	2
35	63	11.15	11.21	6	15	4	11	510	1
36	65	11.30	11.35	5	18	3	15	525	1
37	67	11.48	11.54	6	7	4	3	528	1
38	68	11.55	12.01	6	7	4	3	531	1
39	69	12.02	12.08	6	14	4	10	541	1
40	70	12.16	12.21	5	20	3	17	558	1
41	71	12.36	12.42	6	28	4	24	582	2
42	74	13.04	13.09	5	20	3	17	599	1
43	75	13.24	13.31	7	13	5	8	607	2
44	76	13.37	13.43	6	5	4	1	608	1
45	77	13.42	13.47	5	18	3	15	623	1
46	79	14.00	14.06	6	7	4	3	626	2
47	80	14.07	14.13	6	13	4	9	635	1
48	81	14.20	14.26	6	5	4	1	636	2
49	82	14.25	14.31	6	23	4	19	655	1
50	84	14.48	14.54	6	18	4	14	669	1
51	85	15.06	15.13	7	4	5	-1	668	2
52	86	15.10	15.17	7	11	5	6	674	1
53	87	15.21	15.28	7	17	5	12	686	1
54	89	15.38	15.45	7	9	5	4	690	2
55	90	15.47	15.53	6	34	4	30	720	1
56	92	16.21	16.28	7	30	5	25	745	2
57	94	16.51	16.58	7	7	5	2	747	1
58	95	16.58	17.06	8	19	6	13	760	2
59	96	17.17	17.23	6	13	4	9	769	2
60	98	17.30	17.35	5	8	3	5	774	1
61	99	17.38	17.45	7	8	5	3	777	1
62	100	17.46	17.53	7	7	5	2	779	2
63	101	17.53	17.59	6	21	4	17	796	1
64	102	18.14	18.20	6	11	4	7	803	2
65	103	18.25	18.31	6	5	4	1	804	1
66	104	18.30	18.36	6	17	4	13	817	1
67	106	18.47	18.52	5	4	3	1	818	2
68	107	18.51	18.57	6	7	4	3	821	2
69	108	18.58	19.03	5	16	3	13	834	1
70	109	19.14	19.20	6	23	4	19	853	2
71	111	19.37	19.43	6	19	4	15	868	2
72	113	19.56	20.03	7	11	5	6	874	1
73	114	20.07	20.13	6	17	4	13	887	1
74	116	20.24	20.30	6	4	4	0	887	2
75	117	20.28	20.35	7	56	5	51	938	1
76	120	21.24	21.33	9	5	7	-2	936	1
77	121	21.29	21.36	7	12	5	7	943	2
78	122	21.41	21.47	6	22	4	18	961	1
79	124	22.03	22.10	7	37	4	33	994	1
80	126	22.40	22.50	10	13	7	6	1000	1
81	127	22.53	23.00	7	14	5	9	1009	1
82	129	23.07	23.12	5	4	3	1	1010	1
83	130	23.11	23.18	7	6	5	1	1011	2
84	131	23.17	23.23	6	11	4	7	1018	1
85	132	23.28	23.34	6	5	4	1	1019	1
86	133	23.33	23.39	6	13	4	9	1028	1
87	134	23.46	23.52	6	22	4	18	1046	2
88	137	0.08	0.15	7	11	5	6	1052	1
SUMME					1440	388	1052		

Spalte 10: Bemerkungen dazu, ob der Zug im Ausgangsbahnhof des Streckenabschnitts anfährt oder durchfährt.[1)]

Gelegentlich treten in Spalte 8 negative Pufferzeiten auf. Diese haben ihre Ursache darin, daß bei der Konstruktion des der Strecke zugrundeliegenden Fahrplans Fehler gemacht worden sind. Durch geringfügige Verschiebungen der Abfahrtszeiten wären diese Fehler vermeidbar gewesen.[2)]

In der letzten Zeile der Tabellen sind die Summen für die planmäßigen und kürzesten Zugfolgezeiten sowie für die Pufferzeiten angegeben. Daraus errechnen sich folgende Einzelbelegungsgrade:

Tabelle 4-8: Pufferzeitsummen und Belegungsgrade für die Einzelabschnitte der Strecke AF (Zeitraum 24 Stunden)

Lfd. Nr. (k)	Abschnitt: Bezeichnung	Abschnitt: Länge (km)	Abschnitt: Züge (n_k)	$\sum_{j=1}^{n_k} r_{j,k}$ (min)	B_k (%)
1	AB	6.0	91	1116	22,5
2	BC	3.8	123	1023	29,0
3	CD	6.1	124	924	35,8
4	DE	6.5	126	878	39,0
5	EF	8.7	88	1052	26,9

1) Diese Angaben sind zur Ermittlung der Bedienungszeiten für das Ausfahrtsignal notwendig (vgl. die Ausführungen auf S.17 dieser Arbeit). Im ersten Streckenabschnitt gibt es selbstverständlich nur anfahrende Züge.

2) Da die negativen Pufferzeiten für die Bestimmung des Belegungsgrades nur einen unwesentlichen Einfluß ausüben, sind sie bei den folgenden Berechnungen aus programmtechnischen Gründen gleich Null gesetzt worden.

Der Belegungsgrad ist am höchsten im Abschnitt 4, den n_4 = 126 Züge befahren. Es ist allerdings zu vermuten, daß auch noch andere Faktoren den Grad der Auslastung beeinflussen müssen.[1] Der wesentlichste Einflußfaktor dürfte die von der Abschnittslänge abhängige Fahrzeitdauer sein.[2] Um hier allerdings zu statistisch gesicherten Ergebnissen zu kommen, müßte der Stichprobenumfang beträchtlich vergrößert werden, d.h. die Zahl der zu untersuchenden Streckenabschnitte müßte erhöht werden.[3]

Die Einzelbelegungsgrade der untersuchten Strecke AF für den gesamten Tag sind also als relativ niedrig anzusehen. Daß der Belegungsgrad in den mittleren Streckenabschnitten höher als im ersten und fünften Abschnitt ist, kann darauf zurückgeführt werden, daß Güterzüge fast ausschließlich nur vom zweiten bis vierten Streckenabschnitt verkehren.[4] Der Grund könnte darin liegen, daß die größeren Bahnhöfe A und F durch den Güterverkehr auf Sondergleisen umgangen werden, um einen möglichst ungestörten Betriebsablauf zu gewährleisten. Deswegen finden sich die größten auftretenden Pufferzeiten in den Abschnitten 1 und 5,[5] und zwar zu Zeiten, in denen der Reisezugverkehr stark eingeschränkt ist, nämlich zwischen 1.30 Uhr und 4.00 Uhr.

---

1) Für Abschnitt 1 ergibt sich z.B. mit n_1 = 91 ein niedrigerer Belegungsgrad als für Abschnitt 5 mit n_5 = 88.

2) In Abschnitt 1 beträgt die durchschnittliche Fahrzeitdauer in Minuten 4,57 bei einer Varianz von 0,93 gegenüber 6,48 Minuten (Varianz = 1.00) in Abschnitt 5.

3) Es spricht viel dafür, daß die Anzahl und Länge der Blockabschnitte (Signalabstände) einen größeren Einfluß als die Fahrzeitdauer ausüben.

4) Vgl. Tabelle 4-2 auf S.55 dieser Arbeit.

5) $r_{11,19,5}$ = 120 (Pufferzeit zwischen Zuglaufnummer (11) und (19) im Abschnitt 5 und $r_{13,19,1}$ = 89.

Aber auch für die Zeitintervalle, in denen man normalerweise einen stärkeren Anteil des Reisezugverkehrs unterstellen kann, erhält man, wie Tabelle 4-9 für zwei willkürlich ausgewählte Beispiele zeigt, keine wesentlich anderen Ergebnisse als für den gesamten Tag:

Tabelle 4-9: Pufferzeitsummen und Belegungsgrade der Strecke AF für ausgewählte Zeiträume

Abschnitt	Zeitraum			
	6 - 12		17 - 22	
(k)	$\sum_{j=35}^{69} r_{j,k}$ (min)	B_k (%)	$\sum_{j=95}^{124}$ (min)	B_k (%)
1	270	25,0	266	11,3
2	270	25,0	230	23,3
3	231	35,8	206	31,3
4	214	40,5	200	33,3
5	240	33,3	247	17,7

4.4.2 Ergebnisse für die Gesamtstrecke

Zur Ermittlung des Gesamtbelegungsgrades benötigt man zunächst die Pufferzeiten in den Einzelabschnitten sowie die Zuglaufnummern, zwischen denen diese Pufferzeiten beobachtet werden.[1)] Im nächsten Schritt werden die jeweils kürzesten Pufferzeiten zwischen den Zügen mit gleichen Laufnummern bestimmt. Damit liegen für alle in dem untersuchten Fahrplan vorkommenden Verknüpfungen von Zügen die kürzesten

1) Diese Angaben erhält man aus den Tabellen 4-3 bis 4-7.

TABELLE 4-10 : KUERZESTE PUFFERZEITEN UND ZUGEHOERIGE STRECKENABSCHNITTE FUER DIE ERSTEN 47 VERKNUEPFUNGEN DER STRECKE AE

1.ZUG	2.ZUG	PUFFERZEIT	ABSCHNITT
1	2	3	2
1	3	13	1
2	3	4	4
3	4	0	2
3	5	25	1
4	5	20	4
5	5	4	5
6	7	1	5
7	3	1	5
8	9	4	1
9	10	0	4
9	11	0	1
10	11	0	4
11	12	15	2
11	13	25	1
11	19	120	5
12	13	4	4
13	14	6	2
13	19	89	1
14	15	1	2
14	16	31	4
15	16	25	2
16	17	3	4
17	18	12	4
17	19	29	3
18	19	9	4
19	20	10	1
20	21	5	2
20	22	12	4
20	26	41	5
21	22	4	2
22	23	8	4
23	24	4	2
23	25	0	4
24	26	3	3
25	26	6	4
26	27	3	4
26	28	5	2
26	29	15	1
27	28	0	4
28	29	2	4
29	30	0	1
30	31	11	2
30	32	3	4
30	33	24	5
31	33	7	3
32	33	14	4

Pufferzeiten und die dazugehörigen Streckenabschnitte fest. Tabelle 4-10 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen für die ersten 13 durchgehenden Züge.[1] Die Berechnungen sind bereits schrittweise für jeweils zwei durchgehende Züge durchgeführt worden, so daß die Resultate als "Daten" für den oben dargestellten modifizierten Algorithmus verwendet werden können.

Der Algorithmus zur Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades liefert dann die in Tabelle 4-11 wiedergegebenen Ergebnisse. Die Tabelle ist folgendermaßen zu lesen:[2]

Das erste Zugfolgepaar (Spalte 1) besteht aus den Zügen mit den Laufnummern 1 (Spalte 2) und 3 (Spalte 3). Zwischen diesen besteht eine minimale Pufferzeit von $D^*_{1,3} = 7$ Minuten (Spalte 4). Spalte 6 gibt an, zwischen welchen Zügen und in welchen Abschnitten die Pufferzeit beobachtet wird. Für das erste Zugfolgepaar setzt sich die Gesamtpufferzeit zusammen aus $d_{1,2}$ im Abschnitt 2 und $d_{2,3}$ im Abschnitt 4.[3] Spalte 5 enthält die kumulierten Gesamtpufferzeiten, so daß der Belegungsgrad auch für beliebige Zeitintervalle relativ schnell ermittelt werden kann.

Die Gesamtpufferzeit für den Tagesfahrplan der untersuchten Strecke AF ergibt sich mit 646 Minuten aus Spalte 5 für Zugpaar 86.[4] Diese Gesamtpufferzeit entspricht einem Ge-

---

1) Die Zusammenstellung sämtlicher 183 Verknüpfungen auf der Gesamtstrecke befindet sich im Anhang.

2) Die vollständige, alle 137 Züge umfassende, Tabelle befindet sich im Anhang.

3) $d_{1,2}+d_{2,3} = 7$ (vgl. Tab. 4-10). Diese Alternative ist der kleinere Wert gegenüber $d_{1,3} = 13$. In der Tabelle sind lediglich die für die Bestimmung des Belegungsgrades benötigten Gesamtpufferzeiten aufgeführt.

4) Zugpaar 86 besteht aus den Zügen mit den Laufnummern (137) und (1). Da es sich um einen geschlossenen Fahrplan handelt, ist der erste Zug des Tages zugleich auch Nachfolgezug des letzten Zuges.

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN — SEITE 1 —

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
1	1	3	7	7	A: 1 2 3 B: 2 4
2	3	5	20	27	A: 3 4 5 B: 2 4
3	5	6	4	31	A: 5 6 B: 5
4	6	7	1	32	A: 6 7 B: 5
5	7	8	1	33	A: 7 8 B: 5
6	8	9	4	37	A: 8 9 B: 1
7	9	11	0	37	A: 9 11 B: 1
8	11	19	75	112	A: 11 12 13 14 15 16 17 18 19 B: 2 4 2 2 2 4 4 4
9	19	20	10	122	A: 19 20 B: 1
10	20	26	23	145	A: 20 21 22 23 25 26 B: 2 2 4 4 4
11	26	29	5	150	A: 26 27 28 29 B: 4 4 4
12	29	30	0	150	A: 29 30 B: 1
13	30	33	17	167	A: 30 32 33 B: 4 4

samtbelegungsgrad von

$$B_{1,5} = \frac{1440 - 646}{1440} \; 100 = 55,14\%$$

Damit ist der Gesamtbelegungsgrad deutlich höher als jeder Einzelbelegungsgrad. Vergleicht man verschiedene Zeiträume des Tages, so erhält man als jeweiligen annähernden[1] Gesamtbelegungsgrad die Werte der Tabelle 4-12:

Tabelle 4-12: Gesamtbelegungsgrad der Strecke AF für verschiedene Tageszeiträume

Zeitraum (Uhrzeit)	Zuglaufnummer von	Zuglaufnummer bis	Pufferzeitsumme (Minuten)	Belegungsgrad (%)
0.00-12.00	1	69	340	52,8
12.00-24.00	70	137	306	57,5
6.00-12.00	35	69	154	57,2
17.00-22.00	95	122	134	55,3
7.00- 9.00	38	49	32	73,3
17.00-19.00	96	108	36	70,0

Erwartungsgemäß ist der Gesamtbelegungsgrad zu den Zeiten der (durch den Berufsverkehr bedingten) Verkehrsspitze mit 70,0% bzw. 73,3% deutlich höher als in den übrigen ausgewählten Zeiträumen, deren Belegungsgrad sich nicht wesentlich von dem des Gesamttages unterscheidet.

---

1) Wählt man z.B. für die Bestimmung des Gesamtbelegungsgrades der ersten Tageshälfte als "Grenzzug" den Zug mit der Laufnummer (69) (Ankunft in Abschnitt 5 um 12.08 Uhr), so fallen die letzten 8 Minuten streng genommen bereits in die zweite Tageshälfte. Insofern handelt es sich in Tabelle 4-12 nur um Näherungswerte.

In Tabelle 4-13 wird eine Zusammenstellung der Teil- und Gesamtbelegungsgrade aller denkbaren Kombinationen von mehreren aufeinanderfolgenden Streckenabschnitten gegeben. Die Werte auf der Diagonalen entsprechen dem jeweiligen Einzelbelegungsgrad. Unterhalb der Diagonalen wären die Werte der hier nicht untersuchten Gegenrichtung einzutragen.

Tabelle 4-13: Belegungsgrade für mögliche Kombinationen mehrerer aufeinanderfolgender Streckenabschnitte der Strecke AF

von Abschnitt \ bis Abschnitt	1	2	3	4	5
1	22,5	33,5	42,2	51,1	55,1
2	·	29,0	39,6	49,1	53,6
3	·	·	35,8	45,9	50,4
4	·	·	·	39,0	43,8
5	·	·	·	·	26,9

In Tabelle 4-13 wird nochmals ersichtlich, wie sich eine Einbeziehung zusätzlicher Abschnitte auf den Belegungsgrad der Gesamtstrecke auswirkt. Eine deutliche Steigerung des Belegungsgrades ist vor allem bei Hinzunahme des vierten Streckenabschnitts, der auch der am stärksten belastete Einzelabschnitt ist, zu erkennen.

Dieser Abschnitt wird deshalb zur Engpaßstelle der Gesamtstrecke, weil verschiedene Güterzüge nur diesen einen Abschnitt befahren und die Strecke dann wieder verlassen. Ein zusätzliches Gleis für Güterzüge in diesem Abschnitt würde deshalb eine Verringerung des Gesamtbelegungsgrades bedeuten.

4.4.3 Statistik der Pufferzeiten

Für e i n z e l n e Streckenabschnitte ist in verschiedenen Untersuchungen nachgewiesen worden,[1] daß die Verteilung der Pufferzeiten gut durch eine negative Exponentialverteilung[2] wiedergegeben werden kann. Es soll deshalb geprüft werden, ob diese Verteilung auch auf die Pufferzeiten der untersuchten G e s a m t s t r e c k e AF anwendbar ist.

Wenn man für die Pufferzeiten eine bestimmte Verteilung unterstellen kann, ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten derjenigen Pufferzeiten anzugeben, die eine Einfügung zusätzlicher Züge zulassen, da die Zeitlücken groß genug sind. Eine solche Fahrplanlücke wird im allgemeinen dann als groß genug angesehen, "wenn sie außer der mittleren Belegungszeit gegenüber dem vorfahrenden und dem folgenden Zug eine Zeit von je 5 min Puffer übrig läßt".[3] Für e i n e zwischen zwei durchgehenden Zügen einzulegende zusätzliche Zugfahrt ist also die Mindestpufferzeit

$$d_1 = c_m + 2{\cdot}5 \qquad (4.1)$$ [4]

---

1) Vgl. G. POTTHOFF: A.a.O., S. 131; W. HILLER: Beitrag zur Ermittlung der größten Streckenbelegung. In: Deutsche Eisenbahntechnik, 1968 (H. 8), S. 391.

2) Die negative Exponentialverteilung - bei den in Fußnote 1) zitierten Autoren als Abklingungsfunktion bezeichnet - ist ein Spezialfall der Gammaverteilung, und zwar nimmt ν den Wert 1 an. in der Dichtefunktion

$$f_\Gamma(x;\alpha,\nu) = \begin{cases} \frac{\alpha^\nu}{\Gamma(\nu)} e^{-\alpha x} \cdot x^{\nu-1} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases}$$

(α und ν sind positive reelle Parameter; x ist die Ausprägung der Zufallsvariablen X).

3) Vgl. G. POTTHOFF: A.a.O., S. 131.

4) c_m ist dabei die mittlere Belegungszeit, die sich für einen Tagesfahrplan aus der Beziehung

$$c_m = \frac{1440 - D^*_{q_1,q_n}}{n}$$

zusammensetzt. Für das untersuchte Beispiel erhält man

$$c_m = \frac{1440-646}{86} = 9{,}23.$$

Allgemein gilt für n Züge

$$d_n = n \cdot c_m + (n+1) \cdot 5 \qquad (4.2)$$

Die Dichtefunktion der Exponentialverteilung ist gegeben als

$$f_{exp}(x;a) = a\, e^{-ax}, \quad x \geq 0 \qquad (4.3)$$

und die Verteilungsfunktion als

$$F_{exp}(x;a) = 1 - e^{-ax} \qquad (4.4)$$

Dabei ist x die Ausprägung der Zufallsvariablen X und a ein positiver reeller Parameter. Als Erwartungswert und Varianz der Zufallsvariablen X ergeben sich

$$E(X) = \frac{1}{a} \qquad (4.5)$$

$$V(X) = \frac{1}{a^2} \quad 1) \qquad (4.6)$$

Durch Einsetzen von (4.5) in (4.4) erhält man

$$F_{exp}(x;a) = 1 - e^{-\frac{1}{E(X)}x} \qquad (4.7)$$

In der vorliegenden Untersuchung kann die Zeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zügen als Zufallsvariable D interpretiert werden. Der Erwartungswert für die Pufferzeiten

---

1)
$$E(X) = \int_0^\infty x\, a\, e^{-ax}\, dx = \frac{1}{a}$$

$$V(X) = \int_0^\infty \left[x - E(X)\right]^2 a\, e^{-ax}\, dx = \frac{1}{a^2}$$

ist bekannt mit $E(D) = \frac{646}{86} = 7{,}511$. Somit erhält man als Dichtefunktion der theoretisch zu erwartenden Pufferzeiten

$$f_{exp}\left(d; \frac{1}{7{,}51}\right) = \frac{1}{7{,}51} e^{-\frac{d}{7{,}51}} \qquad (4.8)$$

und als Verteilungsfunktion

$$F_{exp}\left(d; \frac{1}{7{,}51}\right) = 1 - e^{-\frac{d}{7{,}51}} \qquad (4.9)$$

Es ist die Hypothese zu prüfen, diese Verteilung stimme mit der empirisch ermittelten überein. Beide Häufigkeitsverteilungen der Pufferzeiten sind in Tabelle 4-14 wiedergegeben, wobei die Pufferzeiten zu Klassen von 5 Minuten Breite zusammengefaßt worden sind. Für die Ermittlung der erwarteten Werte wurde bei den Klassengrenzen eine Stetigkeitskorrektur von 0,5 vorgenommen.

Tabelle 4-14: Häufigkeitsverteilungen für die Pufferzeiten der Strecke AF

Klasse (i)	Klassenbreite (Minuten) (d_i)	Beobachtete Pufferzeiten		Erwartete Pufferzeiten (absolut)	
		$h^o(d_i)$	$H^o(d_i)$	$h^e(d_i) = f_{exp}(d_i; \frac{1}{7{,}51})$	$H^e(d_i) = F_{exp}(d_i; \frac{1}{7{,}51})$
1	von 0 bis 4	38	38	39	39
2	von 5 bis 9	25	63	23	62
3	von 10 bis 14	10	73	12	74
4	von 15 bis 19	5	78	6	80
5	von 20 bis 24	5	83	3	83
6	von 25 bis 29	1	84	1	84
7	von 30 bis 34	1	85	1	85
8	von 35 bis 39	0	85	1	86
9	von 40 bis 44	0	85	0	86
10	über 44	1	86	0	86

Aus der empirischen Verteilung ergibt sich ein Mittelwert von d = 7,80, der sich dem Erwartungswert E(D) = 7,51 recht gut annähert. Die Varianz von V(d) = 61,81 spricht für die Vermutung einer Exponentialverteilung. Der χ^2-Test ergibt einen Wert von $\chi^2 = 0{,}957$[1] gegenüber einem kritischen Wert der χ^2-Verteilung von 9,49.[2]

Damit kann die Hypothese, es handle sich bei der empirischen Verteilung der Pufferzeiten um eine negative Exponentialverteilung, unter Zugrundelegung eines Signifikanzniveaus von 0,05 nicht verworfen werden.

Sind also für eine bestimmte Strecke die Anzahl der verkehrenden Züge n, der Erwartungswert der Pufferzeiten E(D) und die mittlere Belegungszeit c_m bekannt, so lassen sich mit Hilfe der Exponentialverteilung Wahrscheinlichkeitsaussagen darüber machen, wieviele Züge noch zusätzlich in den Fahrplan eingefügt werden können. Für die untersuchte Strecke AF müßten bei einer mittleren Belegungszeit von $c_m = 9{,}23$[3] die folgenden Zeitlücken vorhanden sein:

Für die Einlegung e i n e s Zuges $d_1 = c_m + 2 \cdot 5 = 19{,}23$
für die Einlegung z w e i e r Züge $d_2 = 2c_m + 3 \cdot 5 = 33{,}46$
für die Einlegung d r e i e r Züge $d_3 = 3c_m + 4 \cdot 5 = 47{,}69$
usw.

---

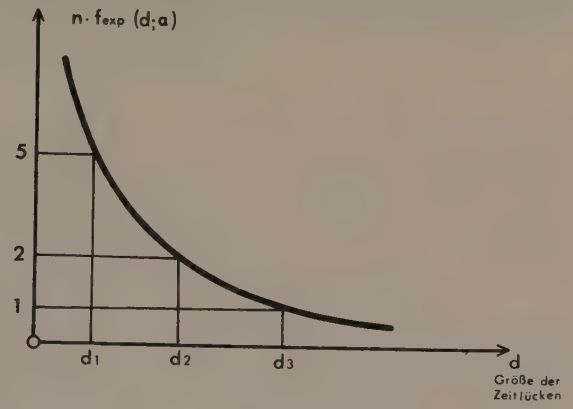
1) Der χ^2-Wert errechnet sich aus dem Ausdruck $\chi^2 = \Sigma\ (h^o - h^e)^2/h^e$, wobei h^o die beobachtete Häufigkeit und h^e die theoretische Häufigkeit ist. Ist der ermittelte Wert für χ^2 größer als der einem Signifikanzniveau von 0,05 entsprechende, tabellierte Wert der χ^2-Verteilung, wird die Anpassung im allgemeinen als unbefriedigend betrachtet.

2) Dieser Wert entspricht einem Signifikanzniveau von 0,05 bei 5-1 = 4 Freiheitsgraden. Die letzten 6 Klassen müssen zusammengefaßt werden, da die theoretisch erwarteten absoluten Häufigkeiten kleiner als 5 sind.

3) Vgl. Fußnote 4) auf S.71.

Es besteht also allgemein die in Abbildung 4-1 dargestellte Abhängigkeit zwischen der Größe und der erwarteten Anzahl der Zeitlücken.

Abb. 4-1: Der Zusammenhang zw. Größe und Anzahl von Zeitlücken



Aus der Dichtefunktion (4.8) läßt sich die Häufigkeit der Lücken, die zwischen d_1 und d_2 liegen und somit einen Zug aufnehmen können, ermitteln als

$$h(d_1) = n \cdot \int_{19,23}^{33,46} \frac{1}{7,51} e^{-\frac{\delta}{7,51}} d\delta = n \left[- e^{-\frac{\delta}{7,51}} \right]_{19,23}^{33,46}$$

$$= n \cdot (e^{-\frac{19,23}{7,51}} - e^{-\frac{33,46}{7,51}}) = 6,6443 - 0,9990$$

$$h(d_1) = 5,6453 \approx 5$$

Es sind also für den untersuchten Fahrplan 5 Zeitlücken zu erwarten, in die zusätzlich e i n Zug eingelegt werden kann.

Entsprechend erhält man

$$h(d_2) = n\,(e^{-\frac{33,46}{7,51}} - e^{-\frac{47,69}{7,51}}) = 0,9990 - 0,1502$$
$$= 0,8488 \approx 1$$

d.h. auch für z w e i zusätzliche Züge ist noch eine Zeitlücke zu erwarten, so daß die Zugkapazität der Strecke um insgesamt 5 + 2 = 7 Züge erhöht werden könnte.

Ein Vergleich mit den b e o b a c h t e t e n Pufferzeiten für die Gesamtstrecke[1] zeigt zwar, daß 7 Lücken größer als d_1 und 1 Lücke größer als d_2 ist, im Grunde also eine gute Übereinstimmung mit den erwarteten Werten besteht; es ist aber zu bedenken, daß sich die Pufferzeiten in Tabelle 4-11 immer auf durchgehende, d.h. die Strecke ohne Überholung durchfahrende Züge beziehen. Die Größe der Pufferzeit ist also in der Regel abhängig von der Anzahl der zwischenzeitlich verkehrenden Züge. Insofern muß jeweils für den Einzelfall geprüft werden, wie sich die Gesamtpufferzeit zwischen zwei durchfahrenden Zügen auf die Zwischenzüge verteilt, und ob dann die Kriterien für das Einlegen zusätzlicher Züge noch erfüllt sind. Für die gegebene Strecke AF ergibt sich, daß in d r e i Fällen trotz einer Gesamtpufferzeit von $D^*_{q_i,q_{i+1}} > d_1$ kein zusätzlicher Zug eingelegt werden konnte und, daß in einem Fall trotz $D^*_{q_i,q_{i+1}} > d_2$ die Zeitlücke nur für die Aufnahme eines Zuges reichte. Vgl. dazu Tabelle 4-15.

---

1) Vgl. Tabelle 4-11.

Tabelle 4-15: Zusammenstellung möglicher zusätzlich einzulegender Züge

Zugpaar Nr.	1. Zug	2. Zug	Pufferzeit	h_{zus}	zwischen Zug	und Zug
2	3	5	20	1	4	5
10	20	26	23	-	-	-
16	37	38	20	1	37	38
27	50	52	25	-	-	-
56	92	94	21	1	93	94
74	117	120	32	1	118	119
78	124	126	20	-	-	-
8[1)]	11	19	75	1	15	16

1) Für dieses Zugpaar war das Kriterium $D^*_{q_i, q_{i+1}} > d_2$ erfüllt.

Es können also auf der Gesamtstrecke insgesamt fünf Züge eingelegt werden, die vom Ausgangsbahnhof A bis zum Endbahnhof F fahren, ohne überholt zu werden.

Bezieht man die Pufferzeitsumme von 646 Minuten auf sämtliche 137 auf der Strecke AF verkehrenden Züge,[1)] kommt man zu dem Ergebnis, daß insgesamt $h(d_1) = 4{,}795 \approx 5$ Lücken für die Einfügung eines Zuges und keine für die Einlegung von mehr als einem Zug vorhanden sind.

4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurde ein allgemeines Rechenprogramm entwickelt, mit Hilfe dessen bei Eingabe des jeweiligen streckenspezifischen Datenmaterials[2)] eine Fahrplananalyse in Hinsicht auf Einzel-,

1) Für 137 Züge erhält man $E(D) = 4{,}715$, $c_m = 5{,}7956$ und $d_1 = 15{,}7956$.

2) Vgl. dazu Abschnitt 4.2.

Teil- und Gesamtbelegungsgrade der untersuchten Strecke erstellt werden kann. Offensichtliche Mängel in der Fahrplangestaltung, die insbesondere an negativen Pufferzeiten zu erkennen sind, werden relativ schnell aufgedeckt. Für die untersuchte Strecke AF mit fünf Streckenabschnitten, auf denen täglich insgesamt 137 Züge verkehrten, wurde einschließlich der statistischen Auswertung der Pufferzeiten weniger als 1 Minuten Rechenzeit benötigt.

Bei den Berechnungen stellte sich heraus, daß der am stärksten belastete Einzelabschnitt mit 39% einen weitaus geringeren Belegungsgrad als die Gesamtstrecke mit 55,1% aufweist.

Die mittlere Pufferzeit gemäß (2.11) liegt zwar mit

$$r_m = \frac{646}{137} = 4{,}715$$

Minuten knapp unterhalb der geforderten Mindestgrenze von 5 Minuten, kann aber in Anbetracht dessen, daß sämtliche kürzesten Zugfolgezeiten auf ganze Minuten aufgerundet wurden,[1)] als durchaus ausreichend angesehen werden.

Die Hypothese, daß sich die beobachtete Pufferzeitverteilung dem theoretischen Modell einer negativen Exponentialverteilung annähere, konnte durch einen χ^2-Test nicht widerlegt werden. Sowohl die Analyse der beobachteten Pufferzeiten als auch die rechnerische Ermittlung durch die Exponentialverteilung ergaben als Resultat, daß in den der untersuchten Strecke zugrunde liegenden Fahrplan noch zusätzlich fünf weitere Züge eingebaut werden könnten.

---

1) Durch diesen "rechnerischen Sicherheitszuschlag" ergab sich natürlich eine Verringerung der Pufferzeitsumme.

Alle diese Ergebnisse basieren allerdings auf der Voraussetzung, daß eine störungsfreie Abwicklung des Betriebsablaufs gewährleistet ist. Da in der Praxis aus den verschiedensten Gründen Verspätungen nicht zu vermeiden sind, soll im nächsten Kapitel die Belastbarkeit der Gesamtstrecke unter Einbeziehung der stochastischen Variablen "Verspätung" anhand eines Simulationsmodells ermittelt werden.

5 BESTIMMUNG DES BELEGUNGSGRADES EINER VORGEGEBENEN STRECKE MIT HILFE EINES SIMULATIONSMODELLS

5.1 Das Problem der Zugverspätungen

Der Ermittlung des Belegungsgrades für eine vorgegebene Strecke lagen bisher streng deterministische Beziehungen zugrunde.

Der Gesamtbelegungsgrad für einen Tagesfahrplan ist determiniert durch die minimale Gesamtpufferzeit $D^*_{q_j,q_n}$, wobei q_j der erste und q_n der letzte Zug des Tages ist, d.h. es gilt

$$B = f\,(D^*_{q_j,q_n}) \qquad \text{für } j = 1,\ldots,n \tag{5.1}$$

Die minimale Pufferzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zügen $d_{j,j+1}$, aus deren Summe sich $D^*_{q_j,q_n}$ zusammensetzt, ist festgelegt durch die fahrplanmäßige Zugfolgezeit $p_{j,j+1}$ sowie durch die kürzeste Zugfolgezeit $c_{j,j+1}$

$$d_{j,j+1} = f\,(p_{j,j+1}, c_{j,j+1}) \tag{5.2}$$

Unter der Voraussetzung, daß die streckenspezifischen Daten wie Signalstandorte, Bedienungszeiten usw. unverändert bleiben und die fahrplanmäßige Reihenfolge der Zugfahrten eingehalten wird, kann die kürzeste Zugfolgezeit $c_{j,j+1}$ als konstante Größe angesehen werden. (5.2) vereinfacht sich dann zu

$$d_{j,j+1} = f\,(p_{j,j+1}) \tag{5.3}$$

und (5.1) zu

$$B = f\,(p_{j,j+1}, p_{n,1}) \quad \text{für } j = 1,\ldots,n-1^{1)} \qquad (5.4)$$

Der Belegungsgrad für eine vorgegebene Strecke ist damit eindeutig festgelegt, solange keinerlei Abweichungen hinsichtlich Abfahrt und Ankunft der Züge für den zugrunde liegenden Fahrplan beobachtet werden.

Es ist aber allgemein bekannt, daß im Eisenbahnbetrieb zwischen Plan und Wirklichkeit erhebliche Unterschiede bestehen.[2)] Für die Bestimmung des Belegungsgrades ist von den vier möglichen Alternativen der Planabweichung

- vor Plan abfahren
- vor Plan ankommen
- verspätet abfahren
- verspätet ankommen

insbesondere die v e r s p ä t e t e A b f a h r t von Interesse. Unter der Voraussetzung, daß die Fahrzeiten der einzelnen Züge im Bildfahrplan als Mindestfahrzeiten[3)] angesehen werden können, wirken sich Verspätungen bei der Abfahrt d i r e k t auf den Belegungsgrad aus, weil sich die Pufferzeitsumme verringert und der Belegungsgrad sich somit erhöht.

Verspätungen bei der Ankunft beeinflussen den Belegungsgrad i n d i r e k t , weil davon ausgegangen werden kann, daß bereits im Anfangsbahnhof einer Strecke vorhandene Verspä-

---

1) $p_{n,1}$ ist die planmäßige Zugfolgezeit des letzten Zuges n des Tagesfahrplans.

2) Vgl. G. POTTHOFF, a.a.O., S. 209.

3) Unter Mindestfahrzeit wird die Fahrzeit verstanden, die ein Zug bei Ausnutzung der für die einzelnen Abschnitte erlaubten Höchstgeschwindigkeiten m i n d e s t e n s benötigt.

tungen auf die zu untersuchende Strecke übertragen werden. Die so "induzierten" verspäteten Abfahrten erhöhen dann wiederum den Belegungsgrad.

Abfahrten und Ankünfte "vor Plan" können bei der Betrachtung von Belegungsgraden außer acht gelassen werden, da es unrealistisch ist, anzunehmen, daß man Züge vor Plan abfahren läßt, um etwaige Verspätungen aufzuholen, oder daß Zeiteinsparungen bei vorzeitig ankommenden Zügen auch eine Abfahrt vor Plan zur Folge haben könnten.

Der Belegungsgrad wird also im praktischen Betriebsablauf entscheidend von der "Verspätung" abhängen, die als stochastische Zufallsvariable in das Modell eingeführt werden soll. Insofern ist der bisher für den Idealfall des störungsfreien Betriebs ermittelte Belegungsgrad lediglich ein Anhaltspunkt für die Belastbarkeit der Strecke.

Die Abfahrten der die gesamte untersuchte Strecke durchfahrenden Züge sollen deshalb für eine bestimmte Anzahl von Tagen um die Störgröße Verspätung mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation verschoben werden. Die Monte-Carlo-Technik besteht "in der Simulation eines Experiments, das den Zweck hat, irgendeine wahrscheinlichkeitstheoretische Eigenschaft einer Gesamtheit von Gegenständen oder Ereignissen durch die Anwendung der Zufallsstichprobe auf die Komponenten dieser Gegenstände oder Ereignisse zu bestimmen".[1] Damit eignen sich Monte-Carlo-Methoden "vorzüglich zur Analyse von stochastischen Prozessen, sofern diese nur in einem Modell theoretisch fixiert sind. Indem man sich auf eine möglichst lange Folge von Zufallszahlen stützt, kann man

---

1) C.W. CHURCHMAN/R.L.ACKOFF/E.L.ARNOFF: Operations Research. Eine Einführung in die Unternehmensforschung. Wien-München, 1961, S. 167.

den Prozeß praktisch beliebig oft 'durchspielen' und seine stochastischen Eigenschaften statistisch ermitteln. So ist es möglich, auch dort (wenigstens numerische) Aussagen zu machen, wo eine mathematische Analyse wegen der Kompliziertheit des betrachteten Systems mit allzu großen Schwierigkeiten verbunden ist, also praktisch nicht möglich ist. Statistische Schlüsse treten deshalb auf, weil die 'ausgewürfelten' Serien der Prozeßabläufe als eine Zufallsstichprobe aus dem Universum aller möglichen (zeitlichen) Entwicklungen des Prozesses aufgefaßt werden können".[1)]

In der vorliegenden Untersuchung entspricht jeder Simulationslauf dem "Durchspielen" eines Tagesfahrplans, wobei jeweils die Verspätung der im Bahnhof A abfahrenden und die gesamte Strecke ohne Überholung durchfahrenden Züge simuliert wird. Man erhält dann für n Wiederholungen n "Tages"-Belegungsgrade b_i und als Erwartungswert für den Belegungsgrad B

$$E(B) = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{n} \qquad (5.5)$$

Für die Varianz ergibt sich

$$V(B) = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i^2}{n} - \left[E(B)\right]^2 \quad 2) \qquad (5.6)$$

---

1) H. SCHNEEWEISS: Monte-Carlo-Simulation eines einfachen Warteschlangenmodells. In: Ablauf- und Planungsforschung, 2(1961), S. 17.

2) Da es sich bei dem Erwartungswert für den Belegungsgrad um einen Anteilswert (vgl. (2.12) auf S.21) handelt, hätte man die Varianz auch als $V(B) = \frac{E(B) \cdot \left[1-E(B)\right]}{n}$ ermitteln können. Die in (5.6) verwendete Formel ist aber genauer, da sie sämtliche Einzelabweichungen der Belegungsgrade b_i vom Stichprobenmittelwert berücksichtigt.

Da erwartet werden kann, daß die aus Zufallsstichproben gewonnenen Belegungsgrade annähernd[1] normalverteilt sind, können bei vorgegebenem Fehlerrisiko Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Höhe des Belegungsgrades getroffen werden.

Eine Beschränkung der Simulation auf die Züge, die die ganze Strecke ohne überholt zu werden durchfahren, erscheint deshalb zweckmäßig, weil diese gegenüber den übrigen Zügen im allgemeinen eine höhere Priorität besitzen, d.h. bei eventuell auftretenden Verspätungen haben diese Züge den Vorrang vor anderen Zügen. Die Verspätung eines durchfahrenden Zuges bedeutet also auch für alle zwischen diesem und dem nächsten durchfahrenden Zug verkehrenden Züge eine automatische Verspätung bzw. Verringerung ihrer Pufferzeit und bewirkt somit eine Erhöhung des Belegungsgrades.

Eine Simulation der Abfahrtszeiten der durchgehenden Züge erscheint auch unter dem Gesichtspunkt als sinnvoll, daß bei Änderungen der Fahrpläne in der Regel diese Züge bis auf wenige Ausnahmen in der gleichen Reihenfolge beibehalten werden, während die übrigen Züge, die nur Teile der Gesamtstrecke befahren, oft ausgelassen oder zeitlich verschoben werden. Die Simulation der Tagesfahrpläne kann somit auch Anhaltspunkte für künftige Fahrplanüberlegungen geben.

5.2 Die Verteilung der Zugverspätungen im Anfangsbahnhof der Strecke

Da in der vorliegenden Untersuchung die Verspätung der Züge als einzige stochastische Variable des Modells simuliert werden soll, muß man sich vor Beginn der Simulation Gedanken

---

1) Die Normalverteilung hat einen Definitionsbereich von $-\infty < b_i < +\infty$. Da die Belegungsgrade zwischen 0 und 1 schwanken, ergibt sich nur eine Annäherung.

darüber machen, welche Verteilung die Verspätungen im Ausgangsbahnhof der Strecke haben könnten.

Der Bahnhof A der untersuchten Strecke war ein Knotenpunkt, in den Züge aus sieben verschiedenen Richtungen einliefen. Die Strecke AF wurde vorwiegend von Zügen befahren, die aus v i e r unterschiedlichen Richtungen eintrafen. Da nur ein sehr geringer Anteil der durchgehenden Züge im Bahnhof A eingesetzt wurde, wurden nur Beobachtungen über diejenigen Züge angestellt, die aus den verschiedenen Richtungen im Bahnhof A ankamen und dann nach F weiterfuhren.

Wenn man unterstellt, daß die für die einzelnen Züge im Fahrplan vorgesehene Haltezeit im Bahnhof vollständig für Ein- und Aussteigen, Be- und Entladen, Lokomotivwechsel usw. benötigt wird, dann sind die Abfahrtszeiten auf der Strecke AF abhängig von den Verspätungen der aus den verschiedenen Richtungen eintreffenden Züge. Für die Simulation benötigt man nun Informationen über die Verteilung dieser Verspätungen, da das Monte-Carlo-Verfahren von gegebenen Parametern der zugrunde liegenden Verteilung ausgeht. Es gilt dann, "mit einem gegebenen Aufwand Stichproben so zu konstruieren, daß diese die Verteilung möglichst gut repräsentieren".[1)]

Da Datenmaterial über Verspätungen der im Bahnhof A eintreffenden Züge zunächst nicht vorlag, wurde unterstellt, daß die Verteilung der Verspätungen durch die Normalverteilung beschrieben werden kann.[2)] Später zugänglich gewordene Daten[3)] ermöglichten eine genauere Schätzung der Parameter.

---

1) P. MERTENS: Simulation. (Betriebswirtschaftliche Studienbücher, Reihe IV, Nr. 61, Hrsg. H. Seischab), Stuttgart, 1969, S. 14.

2) Vgl. dazu Abschnitt 5.3.3.

3) Die Daten konnten entnommen werden aus den im Bahnhof A geführten Zugmeldebüchern. In diesen werden für sämtliche eintreffenden Züge Abweichungen vom Plan verzeichnet.

Es ergab sich, daß die Verspätungen annähernd durch eine Exponentialverteilung beschrieben werden können. Allerdings müßte die Stichprobe, aufgrund derer die Parameter geschätzt wurden, wesentlich erhöht werden, um zuverlässige Schätzwerte liefern zu können.[1] Legt man die bei der Auswertung der Daten gefundenen Schätzwerte als Parameter einer Vorstichprobe zugrunde, so wäre der erforderliche Stichprobenumfang n, wenn der Mittelwert mit einer Genauigkeit von 20% bei einer statistischen Sicherheit von 99% geschätzt werden soll, mit n = 964 festzusetzen.[2] Selbst bei $\Delta_\mu = 0,3$ müßte der Sitchprobenumfang noch n = 429 betragen.

Die verfügbaren Daten des Bahnhofs A ergaben einen Stichprobenumfang von n = 261 mit einem Mittelwert von $\bar{x} = 1,9195$ und einer Standardabweichung von s = 2,4079.[3] Auffallend war, daß bei den erfaßten Zügen nur zwei mit einer größeren Verspätung als 15 Minuten verzeichnet waren, was außerordentlich unrealistisch erscheint. Es ist deshalb zu vermuten, daß bei verschiedenen Zügen, die als "ausgefallen" gekennzeichnet waren, tatsächlich eine Verspätung größeren Ausmaßes vorlag.

---

1) Außerdem ist nicht auszuschließen, daß bei der Erfassung der zur Verfügung stehenden Daten nicht unerhebliche Meßfehler und Ungenauigkeiten unterlaufen sind. Um genauere Vorstellungen über die zugrunde liegende Verteilung zu bekommen, müßte deshalb eine detaillierte Analyse der Verspätungen im Ausgangsbahnhof der Strecke durchgeführt werden.

2) Der Stichprobenumfang errechnet sich nach der Formel $n = \frac{z_{99}^2 \cdot \hat{\sigma}^2}{(\Delta_\mu)^2}$, wobei z_{99} der einer Wahrscheinlichkeit von 99% entsprechende Wert der Normalverteilung, $\hat{\sigma}^2$ die aus der Vorstichprobe geschätzte Varianz der Grundgesamtheit, Δ_μ die vorgegebene Genauigkeit, d.h. prozentuale Abweichung vom Mittelwert. Vgl. L. SACHS, Statistische Auswertungsmethoden, 3. neubearb. u. erw. Aufl., Heidelberg-New York, 1972, S. 197.

3) Die vorzeitig eintreffenden Züge gingen aus den oben erwähnten Überlegungen mit einer Verspätung von N u l l in die Berechnung ein.

Eine Auszählung der erfaßten Daten ergab folgende Häufigkeitsverteilung:

Tabelle 5-1: Häufigkeitsverteilung der Verspätungen der im Bahnhof A aus verschiedenen Richtungen eintreffenden Züge

Verspätungen in Minuten (v_i)	Häufigkeiten		
	$h(v_i)$	$H(v_i)$	$F(v_i)$
0	85	85	0,33
1	61	146	0,56
2	44	190	0,73
3	25	215	0,82
4	18	233	0,89
5	9	242	0,93
6	6	248	0,95
7	4	252	0,97
8	3	255	0,98
9	1	256	0,98
10	1	257	0,98
11	1	258	0,99
12	1	259	0,99
13	0	259	0,99
14	0	259	0,99
15 und mehr	2	261	1,00

Ein χ^2-Test ergab, daß diese Verteilung gut durch eine negative Exponentialverteilung mit einem Erwartungswert von 1,9195 wiedergegeben werden konnte.[1)]

1) Falls die Exponentialverteilung auch in der Grundgesamtheit unterstellt werden könnte, müßte der (Mindest-) Stichprobenumfang n = 473 betragen, wenn die Extremwerte der Stichprobe mindestens 99% der Werte der Grundgesamtheit bei einer statistischen Sicherheit von 95% in sich einschließen sollen. Vgl. L. SACHS, a.a.O., S. 222, Tab. 58.

Da nicht erwartet werden kann, daß in ähnlichen Untersuchungen die Verspätungen im Ausgangsbahnhof immer durch bestimmte Verteilungen beschrieben werden können, ist die Simulation neben normal- und exponentiellverteilten auch für empirisch beobachtete Verspätungen durchgeführt worden.

5.3 Simulation der Verspätungen

5.3.1 Begründung für die Anwendung der Simulation zur Bestimmung des Belegungsgrades in Schienensystemen

Mit Simulation bezeichnet man "das reine, wirklichkeitsäquivalente Nachahmen der Wirklichkeit".[1] Simuliert wird im allgemeinen mit der Absicht, "künstlich" Lösungen solcher Probleme zu ermöglichen, die ohne Zuhilfenahme der Simulation überhaupt nicht oder nur unter großen wirtschaftlichen oder zeitlichen Schwierigkeiten gelöst werden könnten. Künstlich sind die Lösungen deshalb, weil man mit der Anwendung des Hilfsmittels 'Simulation' von irgendeinem unhandlichen Problem der Wirklichkeit zu einem handlichen Modell der Unwirklichkeit übergeht. "If it were possible to deal with reality itself, there would be no need for simulation".[2] Die Simulation liefert also grundsätzlich keine neuen Erkenntnisse;[3] sie dient lediglich dazu, ein M o d e l l der Wirklichkeit aufzustellen, ohne dessen Hilfe es aufgrund der verschiedensten Hindernisse unmöglich gemacht würde, überhaupt zu neuen Erkenntnissen zu gelangen.

---

1) R. KOXHOLT: Die Simulation - ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung. München und Wien, 1967, S. 12.

2) C.J. THOMAS/W.L. DEEMER: The Role of Operational Gaming in Operations Research. In: Operations Research, 1957, Vol. 5, S. 5.

3) Vgl. R. KOXHOLT, a.a.O., S. 13.

Vor der Anwendung der Simulation muß deshalb die Überlegung stehen, ob zwingende Gründe dafür sprechen, der Arbeit bzw. dem Experiment in der Realität eine wirklichkeitsadäquate Nachahmung der Wirklichkeit vorzuziehen.

Für das Problem der Zugverspätungen lassen sich verschiedene solche Gründe anführen, die eine Simulation rechtfertigen:

1. Die Anwendung analytischer Techniken, die elegantere Lösungen ermöglichen würden, ist zu komplex und rechenaufwendig.

2. Eine in Betrieb befindliche Eisenbahn kann nur selten zum Gegenstand kontrollierter Experimente gemacht werden. Verspätungen z.B. würden unerwünschte Folgeerscheinungen (für die Kunden und den Betriebsablauf) mit sich bringen, die nicht wieder rückgängig zu machen sind. Eine Beschränkung auf Teilstücke aber wäre nicht repräsentativ für den allgemeinen Fall.

3. Das Experimentieren in der Wirklichkeit mit Verspätungen wäre langwierig und zeitraubend sowie mit einem hohen finanziellen und materiellen Aufwand verbunden.

Wenn also wichtige Gründe für die Simulation als Nachahmung der Wirklichkeit sprechen, ist noch zu prüfen, welche S i m u l a t i o n s t e c h n i k sich für die Ermittlung des Belegungsgrades besonders eignet.

Bei Modellen, in denen wie bei dem vorliegenden Problem auf die Simulation stochastischer Vorgänge abgestellt wird, kommen im allgemeinen Simulationstechniken zur Anwendung, die unter dem Sammelbegriff "Monte-Carlo-Methoden" zusammenge-

faßt sind.[1] Hier unterscheidet man insbesondere drei Arten von Methoden:

1. Methoden, die als Lösungsverfahren für nicht stochastische Probleme stochastische Experimente anwenden (z.B. näherungsweise Bestimmung von Flächeninhalten).

2. Methoden zur Verminderung des Aufwandes solcher Lösungsverfahren. Hierzu gehören vor allem:
   a) "Variance-Reducing-Techniken"[2] und
   b) "Variance-Methods to reduce Sample-Size"[3]

3. Methoden zur Erzeugung von Zufallszahlen mit vorgegebener statistischer Verteilung für die Simulation von Zufallsprozessen.

Besondere Bedeutung kommt den unter 3. aufgeführten Methoden zu. In dem hier untersuchten Beispiel wurden diese Methoden bei Vorgabe alternativer Verteilungen der Verspätungen für die Simulation benutzt.

Die Zufallszahlen, mit Hilfe derer die zufälligen Verspätungen simuliert wurden, waren sogenannte Pseudozufallszahlen, d.h. sie wurden rechnerisch erzeugt nach einem vorge-

---

1) Vgl. R. KOXHOLT, a.a.O., S. 33.

2) Vgl. dazu J.R. EMSHOFF/R.L.SISSON: Design and Use of Computer Simulation Models. Second printing, London/New York/Toronto, 1971, S. 196 f.

3) Vgl. dazu H. KAHN/A.W. MARSHALL: Methods of Reducing Sample Size in Monte Carlo Computations. In: Operations Research, 1953, Vol. 1, S. 263 ff.

schriebenen Bildungsgesetz und entstanden nicht in einem echten Zufallsprozeß. In größeren Rechenanlagen[1] sind solche Zufallszahlen aus Bibliotheks-Unterprogrammen mit einem einzigen Statement abzurufen.

Im folgenden Abschnitt soll das auf der erwähnten 'Monte-Carlo-Technik' beruhende Simulationsmodell beschrieben werden.

5.3.2 Der Aufbau des Simulationsmodells

Da in dem Modell die Verspätungen sämtlicher Züge simuliert werden, die die Strecke ohne überholt zu werden durchfahren, ergibt sich der jeweilige Belegungsgrad aus der Simulation des Tagesfahrplans. Infolge der als zufällige Ereignisse zu interpretierenden Verspätungen unterscheiden sich die einzelnen Fahrpläne voneinander durch die Verschiebung der Abfahrtszeiten und eine dadurch hervorgerufene Verringerung der Pufferzeitsumme. Nur für den äußerst unwahrscheinlichen Fall, daß für alle 86 Züge eine Verspätung von Null simuliert wird, ergibt sich der gleiche Belegungsgrad wie für den beobachteten Tagesfahrplan.

Auf den Daten dieses Fahrplans[2] baut das Simulationsmodell auf. Folgende Größen werden am Anfang benötigt:

- die Laufnummern der durchgehenden Züge
- die Abfahrtszeiten dieser Züge im Bahnhof A
- die Pufferzeiten zwischen den Zügen

Diese Daten sind bereits vorhanden und werden durch Unterprogramme bereitgestellt.

---

1) Die Rechnungen in dieser Arbeit wurden durchgeführt auf der IBM-Anlage 360/50 des Rechenzentrums der Universität Münster.

2) Vgl. Tabelle 4-2 auf S.55.

Neu einzugeben sind lediglich Erwartungswert und Varianz der Verteilung der Verspätungen sowie ein Wert für die Anzahl der zu simulierenden Tagesfahrpläne. Einen Anhaltspunkt hierfür erhält man, wenn man einen in einer Vorstichprobe erhaltenen Erwartungswert für den Belegungsgrad in die Formel zur Bestimmung des Stichprobenumfangs einsetzt.[1] Damit wurde die Anzahl der Simulationsläufe auf n = 2000 festgesetzt.

Der erste Schritt in jedem Simulationslauf ist die Erzeugung der ersten Zufallszahl. Der vom Verfasser benutzte Zufallszahlengenerator verwendete (0;1)-rechteckverteilte Zufallszahlen.[2] Aus diesen Zufallszahlen mußte durch Transformation entsprechend der gewünschten statistischen Verteilung die Zufallsvariable Verspätung abgeleitet werden. Diese Überführung der gleichverteilten Zufallszahlen im Intervall (0;1) in eine andere Verteilung wird im allgemeinen mit Hilfe der inversen Transformation vorgenommen, die am Beispiel der Exponentialverteilung dargestellt werden soll.[3]

Bei der Transformation wird jeder erzeugten Zufallszahl z_i diejenige Ausprägung v_i der Zufallsvariablen V zugeordnet,

---

1) Die Vorstichprobe ergab einen Belegungsgrad von E(B) = 0,6003. Der erforderliche Stichprobenumfang errechnet sich dann nach der Formel

$$n = \frac{z_{99}^2 \; E(B)\cdot[1-E(B)]}{(\Delta_B)^2}$$

(vgl. L. SACHS, a.a.O., S. 265) bei einer statistischen Sicherheit von 99% und einer erlaubten Abweichung vom Erwartungswert von 3% zu

$$n = \frac{2{,}58^2 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}4}{0{,}03^2} = 1776.$$

Dabei werden normalverteilte Belegungsgrade unterstellt.

2) Auf die verschiedenen Methoden zur Erzeugung von Zufallszahlen soll nicht weiter eingegangen werden, da hierzu eine umfangreiche Literatur existiert. Vgl. J.M. HAMMERSLEY/D.C. HANDSCOMB: Monte Carlo Methods, London 1964, S. 25-42. J. von NEUMANN/G.E. FORSYTHE/P.C. HAMMER: Monte Carlo Methods, Washington 1951, S. 33-38.

3) Vgl. R. KOXHOLT, a.a.O., S. 43.

für die der Wert der Verteilungsfunktion $F(v_i) = z_i$ ist. Wenn also V exponentiell verteilt ist mit der Dichtefunktion

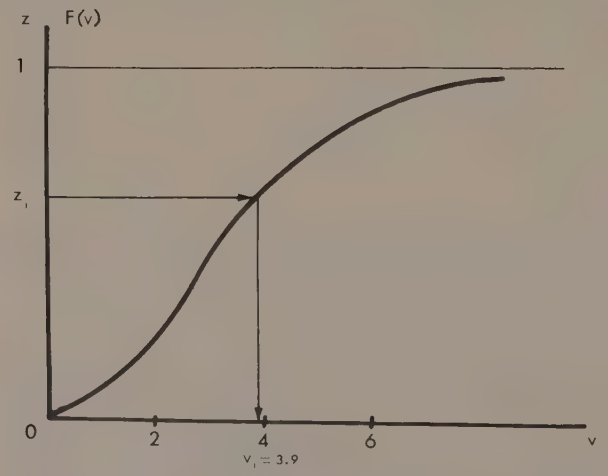
$$f(v) = \mu e^{-\mu v} \tag{5.5}$$

und der Verteilungsfunktion

$$F(v) = W(V \leq v) = \int_0^v f(v)\, dv = 1-e^{-\mu v} \tag{5.6}$$

dann wird durch die Transformation erreicht, daß die erzeugten Realisationen v_i von V untereinander die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzen wie die z_i untereinander und daß sie der Dichtefunktion f(v) genügen. In Abbildung 5-1 ist die Zuordnung zwischen v und z graphisch dargestellt.

Abb. 5-1 : Transformation gleichverteilter Zufallszahlen



Rechnerisch erhält man

$$z = F(v) \qquad \text{bzw.}$$

$$v = F^{-1}(z) .$$

Für

$$F(v) = 1-e^{-v}$$

ergibt sich

$$1-F(v) = e^{-\mu v}$$

$$-\mu v = \ln\left[1-F(v)\right], \text{ d.h. aber}$$

$$v = F^{-1}(z) = -\frac{1}{\mu} \ln (1-z) \qquad (5.7)$$

oder[1)]

$$V = -\frac{1}{\mu} \ln Z . \qquad (5.8)$$

Da die Transformation nur für unbestimmt integrierbare Dichtefunktionen möglich ist, ist z.B. die Erzeugung von normalverteilten Zufallszahlen nur dadurch möglich, daß nach einem besonderen Bildungsgesetz auch wieder gleichverteilte Zufallszahlen verwendet werden. Dadurch wird allerdings im allgemeinen sehr viel Rechenzeit benötigt.[2)]

Mit Hilfe der erzeugten Zufallszahl kann im nächsten Schritt[3)] die Verspätung des e r s t e n Zuges berechnet werden. Damit liegt auch die "neue" Abfahrtszeit des ersten Zuges fest.

---

1) Der Schritt von (5.7) zu (5.8) ist möglich, da (1-z) ebenso gleichverteilt ist wie z.

2) Der vom Verfasser benutzte Zufallszahlengenerator erzeugte eine normalverteilte Zufallszahl durch den nach einem bestimmten Bildungsgesetz erfolgten zwölfmaligen Aufruf einer gleichverteilten Zufallszahl.

3) Die einzelnen Schritte können auch anhand des Flußdiagramms der Abbildung 5-2 verfolgt werden.

Die neue Pufferzeit wird zunächst gleich der alten Pufferzeit gesetzt. Nach der Bestimmung der Verspätung des z w e i t e n Zuges wird geprüft, ob die Abfahrtszeit dieses Zuges kleiner oder gleich der Abfahrtszeit des vorherigen Zuges ist.[1] Falls dieser Fall eintritt, muß die Abfahrtszeit des zweiten Zuges so korrigiert werden, daß sie frühestens um die kürzeste Zugfolgezeit nach der ersten Abfahrt erfolgt. Die Pufferzeit des ersten Zuges würde dann vollständig"verschlungen" und damit gleich Null. Es muß dann weiter abgefragt werden, ob eventuell die "verspätete" Abfahrt zeitlich früher als die planmäßige liegt.[2] Auch dann wird die Abfahrtszeit korrigiert. Danach wird die Verspätung des dritten Zuges simuliert. Wenn die Abfahrtszeit des zweiten Zuges größer ist als die des ersten Zuges, muß die Zeit zwischen der planmäßigen Abfahrt des ersten und zweiten Zuges (ΔF) mit der Zeit zwischen der verspäteten Abfahrt beider Züge (ΔE) verglichen werden.[3] Ist ΔF kleiner oder gleich ΔE, wird die Restriktion der kürzesten Zugfolgezeit nicht verletzt und es kann nach der Kontrollabfrage die Verspätung des nächsten Zuges simuliert werden. Im anderen Fall wird die theoretisch kürzeste neue Abfahrtszeit bestimmt und die Pufferzeit des Vorzuges gleich Null gesetzt. Diese bleibt Null, wenn die theoretisch kürzeste Abfahrtszeit auch zugleich die verspätete Abfahrtszeit ist. Liegt die kürzeste Abfahrtszeit vor der verspäteten, so ergibt sich die Pufferzeit des vorgehenden Zuges aus der Differenz zwischen beiden.

---

1) Dieser Fall tritt dann ein, wenn die Verspätung des ersten Zuges größer ist als die planmäßige Zugfolgezeit zuzüglich Verspätung des zweiten Zuges.

2) Dieser Fall ist nur relevant für die Simulation normalverteilter Verspätungen, weil hier "negative" Verspätungen auftreten können. Ansonsten gilt die Abfrage als Kontrolle der durchgeführten Rechnung.

3) Dabei soll geprüft werden, ob die theoretisch kürzeste Zugfolgezeit, die sich aus der Differenz der fahrplanmäßigen Zugfolgezeit und der Pufferzeit ergibt, eingehalten wird.

Im anderen Fall muß die verspätete Abfahrt auf den Zeitpunkt der kürzest möglichen verschoben werden. In diesem Fall wäre die Pufferzeit des Vorzugs wiederum gleich Null.

Nach der Bestimmung der Abfahrts- und Pufferzeit des letzten durchgehenden Zuges, wird anhand der Pufferzeitsumme der Belegungsgrad dieses Tages berechnet und gespeichert. Anschließend erfolgt die Simulation des nächsten Tagesfahrplans usw. bis die vorgegebene Anzahl der Simulationsläufe erreicht ist.

Nach den k_{max} Simulationsläufen erfolgt dann gemäß (5.5) und (5.6) die Bestimmung von Erwartungswert und Varianz der Belegungsgrade, an die sich eine statistische Auswertung anschließt.

Die einzelnen Schritte des Modells sind zusammengefaßt im Flußdiagramm der Abbildung 5-2. Die Arbeitsweise des Modells soll nochmals an einem konstruierten Beispiel von fünf Zügen, in dem die wichtigsten vorkommenden Fälle enthalten sind, veranschaulicht werden.

In der Ausgangssituation seien bekannt

- die planmäßigen Abfahrtszeiten
- die planmäßigen Pufferzeiten
- die Verspätungen[1)]

der einzelnen Züge.

Gesucht sind die durch die Verspätungen verursachten e f f e k t i v e n Abfahrts- und Pufferzeiten, d.h., daß sich die Werte der Tabelle für E_i und P_i erst während der Rechnung ergeben.

---

1) Aus Vereinfachungsgründen sind die im Modell zu simulierenden Verspätungen für das Beispiel bereits vorgegeben. (Vgl. Tabelle 5-2).

Abb.5-2 : FLUSSDIAGRAMM DES SIMULATIONSMODELLS

KMAX = Anzahl der Simulationsläufe
IMAX = Anzahl der Züge
V(I) = Verspätung
F(I) = Planmäßige Abfahrt
E(I) = Verspätete Abfahrt
ΔF = Differenz zwischen zwei planmäßigen Abfahrten
ΔE = Differenz zwischen zwei verspäteten Abfahrten
C(I) = Theoretisch kürzeste Abfahrtszeit nach Berücksichtigung der Verspätung
P(I) = Kürzeste Pufferzeit nach Berücksichtigung der Verspätung
D(I) = Kürzeste Pufferzeit bei planmäßiger Abfahrt

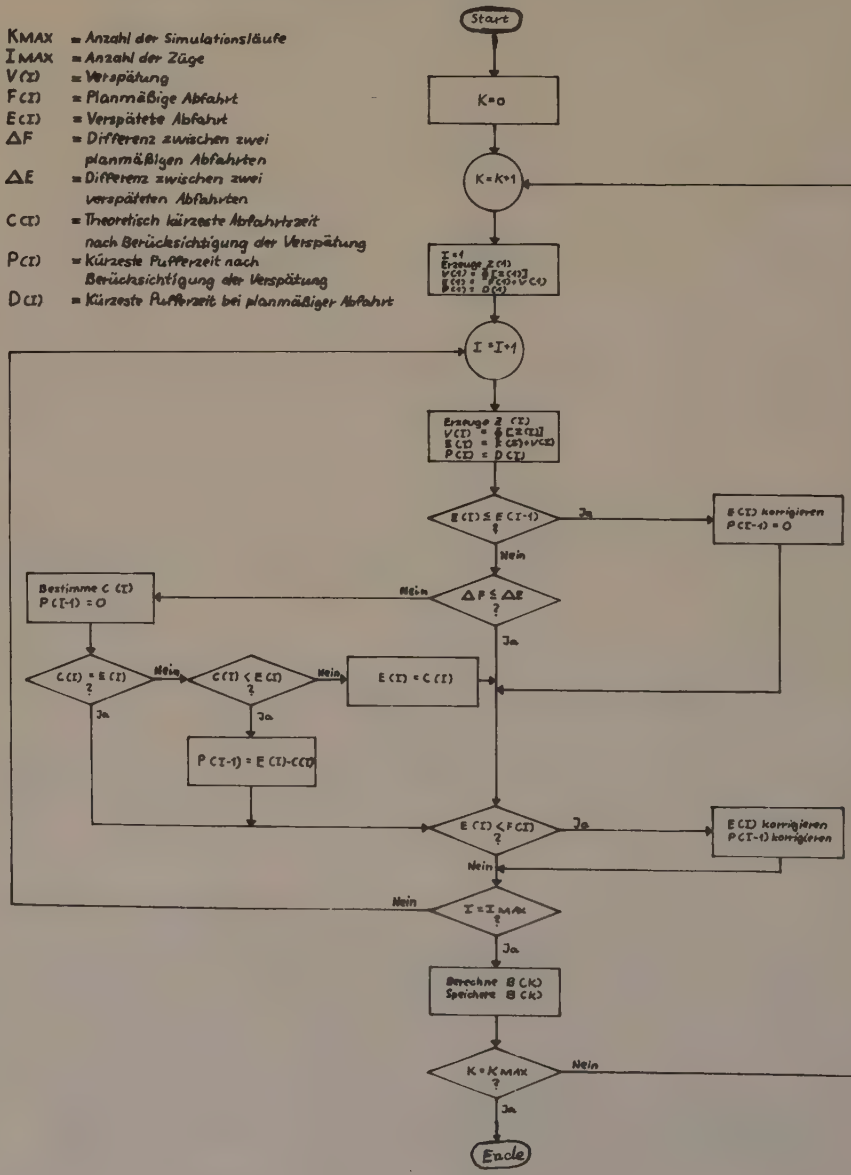


Tabelle 5-2: Konstruiertes Beispiel zum Simulationsmodell

Zug (i)	Abfahrt (F_i)	Verspätung (V_i)	Abfahrt (E_i)	Pufferzeit (D_i)	Pufferzeit (P_i)
1	8.15	4	8.19	6	6
2	8.24	11	8.35	3	0
3	8.31	0	8.39	4	0
4	8.44	3	8.48	5	1
5	8.53	0	8.53	7	7

Aufgrund der Verspätung des ersten Zuges erhält man E_1 = 8.19 und $P_1 = D_1 = 6$. Im nächsten Schritt (I = I+1) ergibt sich E_2 zu 8.35, wobei allerdings noch geprüft werden muß, ob diese Abfahrtszeit nicht eventuell zu korrigieren ist. Da E_2 größer als E_1, ΔF kleiner als ΔE[1)] und E_2 größer als F_2, findet keine Korrektur statt, so daß sich E_2 = 8.35 und zunächst $P_2 = 3$ ergibt. Für den dritten Zug folgt aus $V_3 = 0$ die Abfahrtszeit E_3 = 8.31. In diesem Fall ist E_3 kleiner als E_2 und muß korrigiert werden. Die kürzeste Zugfolgezeit, in der Zug 3 dem Zug 2 folgen darf, ist (8.31 - 8.24) - 3 = 4 Minuten bzw. E_3 = 8.39 . Die Pufferzeit des zweiten Zuges ist dann $P_2 = 0$. Für den vierten Zug ergibt sich zunächst E_4 = 8.47. E_4 ist damit größer als E_3 und ΔF größer als ΔE. Die frühest mögliche Abfahrtszeit C_4 wäre C_4 = 8.39 + [(8.44 - 8.31) - 4] = 8.39 + 9 Minuten = 8.48. P_3 wäre in diesem Fall Null. C_4 ist nicht gleich E_4 und nicht kleiner als E_4, woraus folgt E_4 = 8.48 und $P_3 = 0$.

Für den fünften Zug ergibt sich E_5 = 8.53. E_5 ist größer als E_4 und ΔF größer als ΔE. C_5 ist 8.48 + 4 = 8.52 und damit kleiner als E_5. Zwischen den Abfahrten der Züge 4 und 5 ist

1) Unter ΔF bzw. ΔE sind die zeitlichen Differenzen der Abfahrten zweier aufeinanderfolgender Züge zu verstehen.

also noch eine Minute Pufferzeit vorhanden und E_5 muß nicht mehr korrigiert werden. Es ergibt sich $E_5 = 8.53$, $P_4 = 1$ und $P_5 = 7$. Damit ist $I_{max} = 5$ erreicht und es müßten neue Verspätungen simuliert werden.

Welche Ergebnisse sich bei der Simulation des Tagesfahrplans der untersuchten Strecke AF für alternative Verspätungsverteilungen ergeben haben, wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.3.3 Normalverteilte Verspätungen

Um die Verspätungen der in A abfahrenden Züge mit Hilfe von Monte-Carlo-Verfahren simulieren zu können, ist normalerweise eine genaue Vorstellung von der empirischen Verteilung der Verspätungen derjenigen Züge notwendig, die den Bahnhof A in Richtung F verlassen. Die Verspätungen dieser Züge hängen aber, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, in erster Linie von den Verspätungen der in A ankommenden und nach F weiterfahrenden Züge ab.

Bei Fertigstellung des Simulationsmodells lag über die Verteilung dieser Verspätungen noch kein Datenmaterial vor. Es wurde deshalb zunächst davon ausgegangen, daß eine Normalverteilung der Verspätungen unterstellt werden könne. Als Parameter wurden im einen Fall willkürlich $\mu = 2$ und $\sigma = 7$ angenommen und in einem anderen Fall $\mu = 3$ und $\sigma = 5$. Für beide Fälle ergab sich bei $n = 1000$ Simulationsläufen ein durchschnittlicher Belegungsgrad von ca. 68% bei einer Standardabweichung von $s = 0{,}01$.[1)]

---

1) Da die Verspätungen aufgrund von hypothetischen Parametern simuliert wurden, soll auf eine genauere Analyse der Ergebnisse verzichtet werden.

Nach der Auswertung der später zugänglich gewordenen Daten wurden der Erwartungswert und die Varianz der beobachteten Verspätungen als neue Parameter zur Simulation normalverteilter Zufallszahlen verwendet, obwohl keineswegs gesichert erschien, daß es sich dabei um die "wahren" Werte der Grundgesamtheit handelte.[1)]

Die Simulationsergebnisse für e i n e n Tagesfahrplan mit diesen Parametern sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Die einzelnen Spalten der Tabelle sind wie folgt zu interpretieren:

Spalte 1: Laufnummer des Zuges i
Spalte 2: Planmäßige Abfahrtszeit F_i des Zuges i
Spalte 3: Simulierte Verspätung des Zuges i
Spalte 4: Effektive Abfahrtszeit E_i des Zuges i
Spalte 5: Planmäßige Pufferzeit des Zuges i
Spalte 6: Effektive Pufferzeit des Zuges i[2)]
Spalte 7: Planabweichungen, d.h. die Differenz zwischen effektiver und planmäßiger Abfahrtszeit des Zuges i

Unter der Tabelle sind die planmäßige und effektive Pufferzeitsumme angegeben, sowie der Belegungsgrad, der sich aus der letzteren ergibt. Weiter sind am Schluß der Tabelle die vorgegebenen Parameter und die Nummer des zufällig ausgewählten Simulationslaufes verwertet. Für 1000[3)] simulierte Tagesfahrpläne ergab sich als Erwartungswert für den Belegungsgrad ein Wert von $E(B_{NV}) = 0{,}6112$ bei einer Standardabweichung von $s_B = V(B) = 0{,}0093$. Eine Auswertung der Belegungsgrade ist in der Häufigkeitsverteilung der Tabelle 5-4 vorgenommen worden.

---

1) Vgl. dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 5.2.

2) Die effektive Pufferzeit des Zuges i läßt sich endgültig erst berechnen, wenn E_{i+1} feststeht.

3) Wegen der hohen Rechenzeit bei der Erzeugung normalverteilter Zufallszahlen wurde der Stichprobenumfang auf 1000 beschränkt.

TABELLE 5-3: ERGEBNIS EINES SIMULATIONSLAUFES FUER NORMALVERTEILTE VERSPAETUNGEN

ZUG NR.	ABF. F(I)	VERSP. V(I)	ABF. E(I)	PUFFERZEIT PLAN	PUFFERZEIT EFF.	PLAN-ABWEICHUNG
1	2	3	4	5	6	7
1	0.06	1	0.07	7	7	1
3	0.23	5	0.28	20	15	5
5	0.53	0	0.53	4	4	0
6	1.06	4	1.10	1	0	4
7	1.14	1	1.17	1	0	3
8	1.19	1	1.21	4	3	2
9	1.26	1	1.27	0	0	1
11	1.30	7	1.37	75	70	7
19	3.35	2	3.37	10	9	2
20	3.50	1	3.51	23	23	1
26	4.44	6	4.50	5	5	5
29	5.01	8	5.09	0	0	5
30	5.04	5	5.12	17	10	8
33	5.38	1	5.39	19	19	1
35	6.08	9	6.17	14	5	9
37	6.33	0	6.33	20	20	3
38	6.58	0	6.58	5	5	0
39	7.12	1	7.13	0	0	1
40	7.17	5	7.22	2	0	5
41	7.27	2	7.30	0	0	3
42	7.30	5	7.35	1	0	5
43	7.43	0	7.47	5	4	4
45	7.56	3	7.59	3	2	3
47	8.15	2	8.17	0	0	2
48	8.18	8	8.26	15	14	8
49	8.38	6	8.44	0	0	5
50	8.42	6	8.48	25	19	5
52	9.21	0	9.21	10	10	0
54	9.41	7	9.48	6	0	7
55	10.00	0	10.01	11	11	1
56	10.15	5	10.20	2	0	5
57	10.21	1	10.24	3	3	2
59	10.34	6	10.40	5	1	5
62	10.49	2	10.51	1	0	2
63	11.03	0	11.04	4	4	1
65	11.18	3	11.21	5	3	3
67	11.36	0	11.36	3	3	0
68	11.43	4	11.47	2	2	4
69	11.49	5	11.54	10	6	5
70	12.04	1	12.05	9	7	1
71	12.16	0	12.16	18	18	0
74	12.51	4	12.55	10	6	4
75	13.06	0	13.04	8	8	0
76	13.23	5	13.28	1	0	5
77	13.28	0	13.32	5	1	4
79	13.40	0	13.40	3	3	0
80	13.55	5	14.00	1	0	5
81	14.00	4	14.04	1	0	4
82	14.15	0	14.18	7	4	3
84	14.35	0	14.35	5	6	2
85	14.45	5	14.50	0	0	5
86	14.57	4	15.02	1	0	4
87	15.01	0	15.05	5	5	4
89	15.19	5	15.24	4	0	5
90	15.32	0	15.33	19	19	1
92	15.58	3	16.01	21	20	2
94	16.34	2	16.36	1	1	2
95	16.38	2	16.40	13	11	2
96	16.56	0	16.56	6	6	2
98	17.19	10	17.29	1	0	10
99	17.24	2	17.33	0	0	9
100	17.27	3	17.36	2	0	3
101	17.41	4	17.48	10	6	7
102	17.54	3	17.57	7	7	3
103	18.14	4	18.18	1	1	4
104	18.19	4	18.23	5	3	2
106	18.35	1	18.36	3	3	1
108	18.45	1	18.46	5	6	1
109	18.56	4	18.58	12	11	2
111	19.17	3	19.20	10	9	2
113	19.44	2	19.46	6	6	2
114	19.54	3	19.57	5	4	3
116	20.04	2	20.06	0	0	2
117	20.17	2	20.19	32	32	2
120	21.01	3	21.04	0	0	3
121	21.10	0	21.13	7	7	3
122	21.28	6	21.34	7	1	6
124	21.49	0	21.49	20	20	0
126	22.16	2	22.18	5	4	2
127	22.40	0	22.40	4	4	0
129	22.55	3	22.58	1	1	3
131	23.04	4	23.08	1	0	4
132	23.08	3	23.11	1	1	3
133	23.18	8	23.26	5	0	8
134	23.27	1	23.29	8	8	2
137	23.56	4	24.00	5	2	4

PUFFERZEITSUMME (PLAN): 646
PUFFERZEITSUMME (EFF.): 528

E(V) = 1.9137
STD.ABW.= 2.3978

BELEGUNGSGRAD: 0.6333

91. SIMULATIONS_AU=

TABELLE 5-4: HAEUFIGKEITSVERTEILUNG DER BELEGUNGSGRADE BEI NORMALVERTEILTEN VERSPAETUNGEN

INTERVALL				HAEUFIGKEITEN	V.H.
		BIS	0.5833	0	0.0
UE.	0.5833	BIS	0.5870	0	0.0
UE.	0.5870	BIS	0.5907	0	0.0
UE.	0.5907	BIS	0.5945	3	0.003
UE.	0.5945	BIS	0.5982	10	0.010
UE.	0.5982	BIS	0.6019	36	0.036
UE.	0.6019	BIS	0.6056	128	0.128
UE.	0.6056	BIS	0.6094	204	0.204
UE.	0.6094	BIS	0.6131	231	0.231
UE.	0.6131	BIS	0.6168	219	0.219
UE.	0.6168	BIS	0.6205	106	0.106
UE.	0.6205	BIS	0.6243	46	0.046
UE.	0.6243	BIS	0.6280	10	0.010
UE.	0.6280	BIS	0.6317	5	0.005
UE.	0.6317	BIS	0.6354	2	0.002
UE.	0.6354	BIS	0.6392	0	0.0
UE.	0.6392			0	0.0

E(B) = 0.611236
STD.ABW. = 0.009313

TABELLE 5-5: VERTEILUNG DER BELEGUNGSGRADE BEI NORMALVERTEILTEN VERSPAETUNGEN

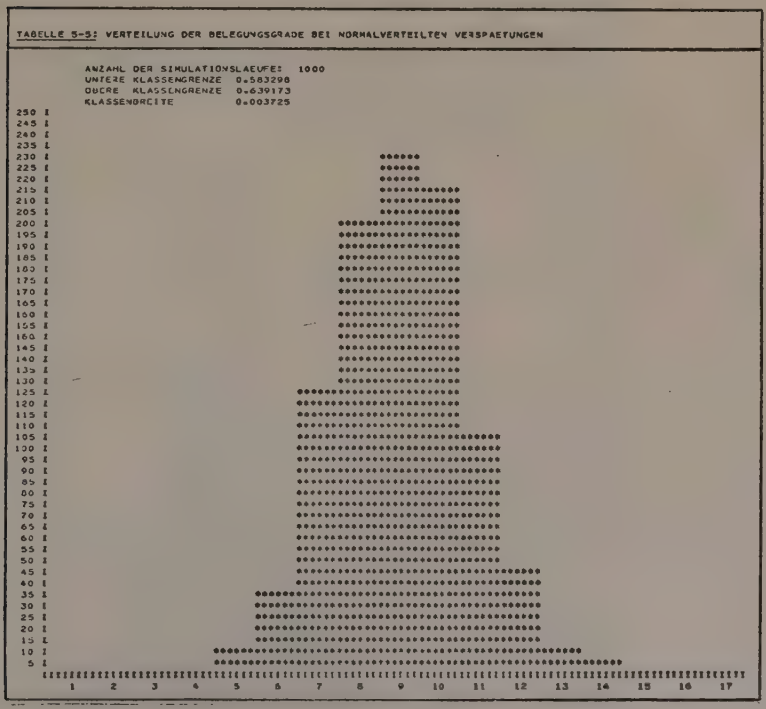


TABELLE 5-6: HAEUFIGKEITSVERTEILUNG TRANSFORMIERTER BELEGUNGSGRADE BEI NORMALVERTEILTEN VERSPAETUNGEN

INTERVALL		HAEUFIGKEITEN	V.H.
	BIS 49.6303	0	0.0
UE.49.6303	BIS 49.8703	0	0.0
UE.49.8703	BIS 50.1103	0	0.0
UE.50.1103	BIS 50.3503	0	0.0
UE.50.3503	BIS 50.5902	8	0.008
UE.50.5902	BIS 50.8302	30	0.030
UE.50.8302	BIS 51.0702	111	0.111
UE.51.0702	BIS 51.3102	232	0.232
UE.51.3102	BIS 51.5502	282	0.282
UE.51.5502	BIS 51.7902	193	0.193
UE.51.7902	BIS 52.0302	97	0.097
UE.52.0302	BIS 52.2702	35	0.035
UE.52.2702	BIS 52.5102	8	0.008
UE.52.5102	BIS 52.7502	4	0.004
UE.52.7502	BIS 52.9901	0	0.0
UE.52.9901	BIS 53.2301	0	0.0
UE.53.2301		0	0.0

E(B) = 51.430283
STD.ABW. = 0.069877

TABELLE 5-7: VERTEILUNG DER TRANSFORMIERTEN BELEGUNGSGRADE BEI NORMALVERTEILTEN VERSPAETUNGEN

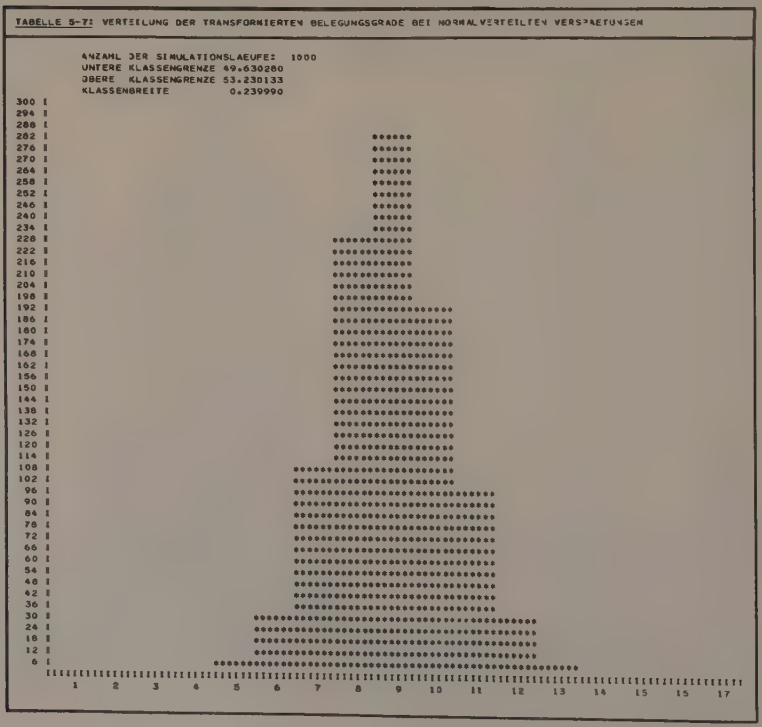


Tabelle 5-4 zeigt ebenso wie Tabelle 5-5, in der die gleiche Verteilung g r a p h i s c h dargestellt worden ist,[1] daß die Belegungsgrade sehr dicht um den Erwartungswert für den Belegungsgrad gestreut sind. Die Kurve hat einen starken positiven Exzeß.[2]

Eine bessere Approximation durch die Normalverteilung wird erreicht, wenn man die Belegungsgrade einer Arcus-Sinus-Transformation unterwirft. Die in Prozentsätzen errechneten Belegungsgrade werden dabei nach der Formel

$$b' = \arcsin \sqrt{b}$$

in Winkel von 0° bis 90° umgewandelt. Die Varianz von b' ist dann nur noch vom Stichprobenumfang n abhängig.[3] Die Ergebnisse dieser Transformation sind in den Tabellen 5-6 und 5-7 dargestellt.

5.3.4 Exponentiell verteilte Verspätungen

Da die Verspätungen der im Bahnhof A ankommenden und nach F weiterfahrenden Züge gut durch eine Exponentialverteilung beschrieben werden konnten, wurde die Simulation auch auf der Grundlage exponentiell verteilter Verspätungen durchgeführt. Tabelle 5-8 zeigt die Ergebnisse e i n e s Simulationslaufes. Aufgrund der Verspätungen ergab sich eine Redu-

---

1) Dabei entsprechen jeweils sechs Sterne einer beobachteten Häufigkeit von 5.

2) Von positivem Exzeß spricht man dann, wenn bei symmetrischen Verteilungen das Maximum über dem Maximum der Normalverteilung liegt.

3) Vgl. R.A. FISHER/F. YATES: Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research, sixth Edition, London, 1963, S. 16.

TABELLE 5-8: ERGEBNIS EINES SIMULATIONSLAUFES FUER EXPONENTIELL VERTEILTE VERSPAETUNGEN

ZUG NR.	ABF. F(I)	VERSP. V(I)	ABF. E(I)	PUFFERZEIT PLAN	PUFFERZEIT EFF.	PLAN-ABWEICHUNG
1	2	3	4	5	6	7
1	0.06	0	0.06	7	7	0
3	0.23	0	0.23	20	20	0
5	0.53	0	0.53	4	4	0
6	1.05	0	1.06	1	1	0
7	1.14	2	1.16	1	1	2
8	1.19	12	1.31	4	0	12
9	1.26	0	1.34	0	0	8
11	1.30	0	1.38	75	57	9
19	3.35	0	3.35	10	10	0
20	3.50	1	3.51	23	22	1
26	4.44	0	4.44	5	5	0
29	5.01	1	5.02	0	0	1
30	5.04	0	5.05	17	17	1
33	5.38	1	5.39	19	19	1
35	6.08	2	6.10	14	14	2
37	6.33	2	6.35	20	20	2
38	6.58	2	7.00	5	5	2
39	7.12	3	7.15	0	0	3
40	7.17	3	7.20	2	2	3
41	7.27	5	7.32	0	0	5
42	7.30	5	7.35	1	0	5
43	7.43	2	7.47	5	1	4
45	7.56	0	7.56	3	3	0
47	8.15	0	8.15	0	0	0
48	8.18	1	8.19	15	16	1
49	8.38	1	8.39	0	0	1
50	8.42	1	8.43	25	25	1
52	9.21	3	9.24	10	9	3
54	9.41	2	9.43	5	5	2
55	10.00	4	10.04	11	9	4
56	10.15	2	10.17	2	1	2
57	10.21	1	10.22	3	3	1
59	10.34	1	10.35	5	5	1
62	10.49	1	10.50	1	1	1
63	11.03	1	11.04	4	4	1
65	11.18	1	11.19	5	6	1
67	11.36	2	11.38	3	1	2
68	11.43	0	11.43	2	2	0
69	11.49	1	11.50	10	9	1
70	12.04	0	12.04	8	8	0
71	12.16	0	12.16	18	18	0
74	12.51	1	12.52	10	10	1
75	13.04	2	13.06	9	7	2
76	13.23	1	13.24	1	1	1
77	13.28	4	13.32	5	1	4
79	13.40	3	13.40	3	3	0
80	13.55	4	13.59	1	0	4
81	14.00	0	14.03	1	0	3
82	14.15	2	14.17	7	6	2
84	14.35	1	14.36	6	6	1
85	14.45	1	14.46	0	0	1
86	14.57	1	14.58	1	0	1
87	15.01	5	15.01	0	5	0
89	15.19	3	15.22	4	3	3
90	15.32	2	15.34	19	19	2
92	15.58	2	16.00	21	19	2
94	16.34	0	16.34	1	1	0
95	16.38	1	16.39	13	12	1
96	16.56	0	16.56	5	5	0
98	17.19	0	17.19	1	1	0
99	17.24	3	17.27	0	0	3
100	17.27	1	17.30	2	0	3
101	17.41	1	17.42	10	10	1
102	17.54	1	17.55	7	6	1
103	18.14	0	18.14	1	1	0
104	18.19	6	18.25	6	0	6
106	18.35	0	18.35	3	3	0
108	18.45	0	18.45	5	5	0
109	18.54	0	18.54	12	12	0
111	19.17	0	19.17	10	10	0
113	19.44	1	19.45	5	5	1
114	19.54	0	19.54	5	5	0
116	20.04	1	20.05	0	0	1
117	20.17	4	20.21	32	29	4
120	21.01	1	21.02	0	0	1
121	21.10	1	21.11	7	7	1
122	21.28	1	21.29	7	7	1
124	21.49	2	21.51	20	19	2
126	22.16	1	22.17	5	5	1
127	22.40	4	22.40	4	4	0
129	22.55	2	22.57	1	0	2
131	23.04	0	23.05	1	1	1
132	23.08	2	23.10	1	0	2
133	23.18	1	23.19	5	5	1
134	23.27	3	23.27	9	8	0
137	23.55	3	23.56	6	6	0

PUFFERZEITSUMME (PLAN): 646
PUFFERZEITSUMME (EFF.): 590

E(V) = 1.9157
STD.ABW.= 2.3379

BELEGUNGSGRAD: 0.5903

823.SIMU_ATIONS_AU=

TABELLE 5-9: HAEUFIGKEITSVERTEILUNG DER BELEGUNGSGRADE BEI EXPONENTIELL VERTEILTEN VERSPAETUNGEN

INTERVALL				HAEUFIGKEITEN	V.H.
		BIS	0.5742	0	0.0
UE.	0.5742	BIS	0.5777	0	0.0
UE.	0.5777	BIS	0.5813	3	0.001
UE.	0.5813	BIS	0.5848	12	0.006
UE.	0.5848	BIS	0.5883	44	0.022
UE.	0.5883	BIS	0.5919	134	0.067
UE.	0.5919	BIS	0.5954	269	0.134
UE.	0.5954	BIS	0.5989	373	0.186
UE.	0.5989	BIS	0.6025	414	0.207
UE.	0.6025	BIS	0.6060	301	0.150
UE.	0.6060	BIS	0.6095	219	0.109
UE.	0.6095	BIS	0.6131	117	0.058
UE.	0.6131	BIS	0.6166	70	0.035
UE.	0.6166	BIS	0.6201	32	0.016
UE.	0.6201	BIS	0.6237	9	0.004
UE.	0.6237	BIS	0.6272	1	0.000
UE.	0.6272			2	0.001

E(B) = 0.600694
STD.ABW. = 0.008830

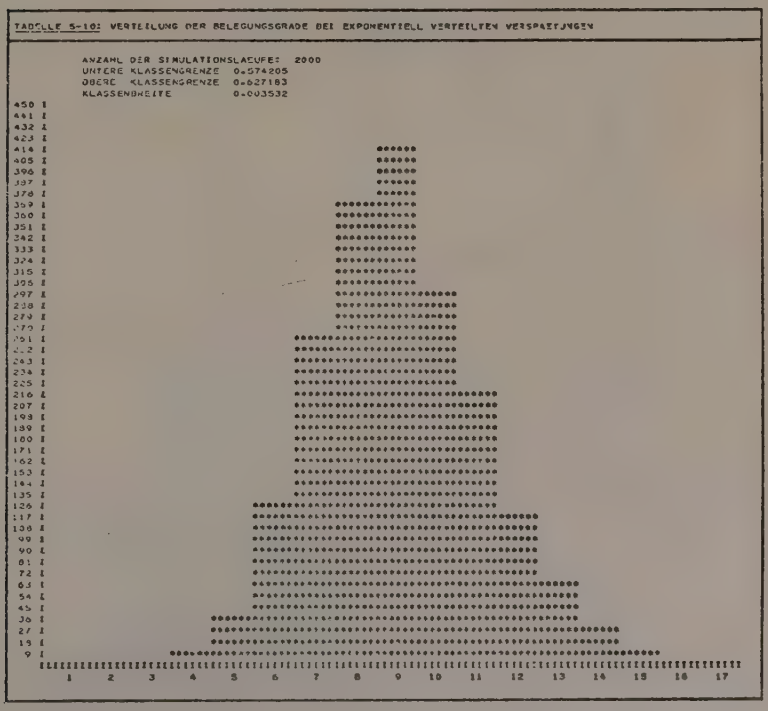
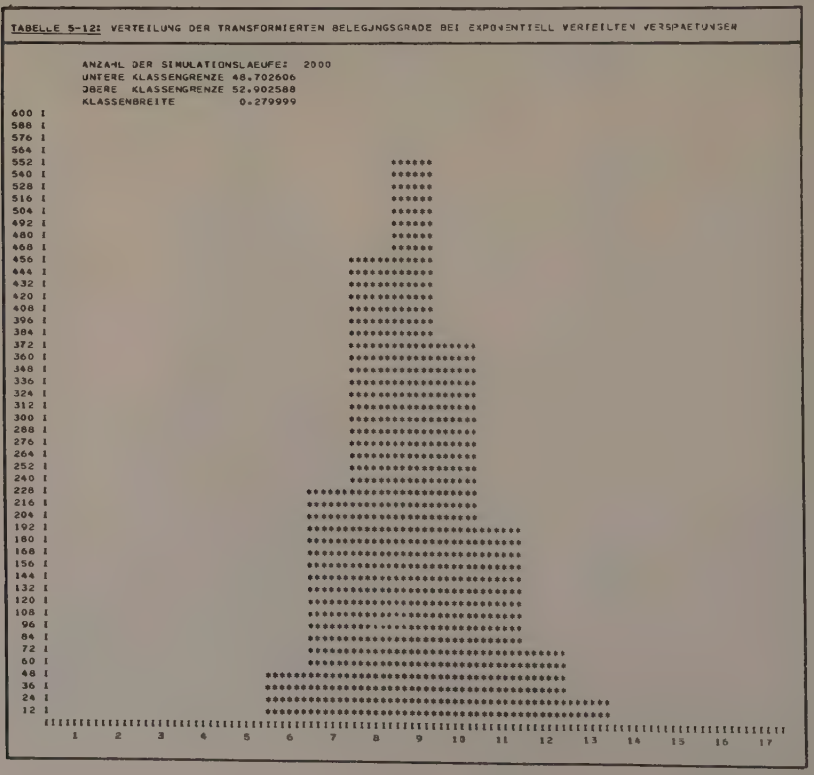


TABELLE 5-11: HAEUFIGKEITSVERTEILUNG TRANSFORMIERTER BELEGUNGSGRADE BEI EXPONENTIELL VERTEILTEN VERSPAETUNGEN

INTERVALL		HAEUFIGKEITEN	V.H.
	BIS 48.7026	0	0.0
UE.48.7026	BIS 48.9826	0	0.0
UE.48.9826	BIS 49.2626	0	0.0
UE.49.2626	BIS 49.5426	0	0.0
UE.49.5426	BIS 49.8226	7	0.003
UE.49.8226	BIS 50.1026	52	0.026
UE.50.1026	BIS 50.3826	238	0.119
UE.50.3826	BIS 50.6626	462	0.231
UE.50.6626	BIS 50.9426	552	0.276
UE.50.9426	BIS 51.2226	380	0.190
UE.51.2226	BIS 51.5026	195	0.097
UE.51.5026	BIS 51.7826	80	0.040
UE.51.7826	BIS 52.0626	26	0.013
UE.52.0626	BIS 52.3426	6	0.003
UE.52.3426	BIS 52.6226	2	0.001
UE.52.6226	BIS 52.9026	0	0.0
UE.52.9026		0	0.0

E(B) = 50.802612
STD.ABW. = 1.021856

TABELLE 5-12: VERTEILUNG DER TRANSFORMIERTEN BELEGUNGSGRADE BEI EXPONENTIELL VERTEILTEN VERSPAETUNGEN



zierung der Pufferzeitsumme von 646 auf 590 Minuten, was einer Erhöhung des Belegungsgrades von 55% auf 59% entspricht.

Für die Durchspielung von 2000 Tagesfahrplänen wurde ein Erwartungswert von $E(B_{exp}) = 0{,}6007$ bei einer Standardabweichung von $s_B = 0{,}0088$ ermittelt. Die Häufigkeitsverteilung und das graphische Bild der einzelnen Belegungsgrade sind in den Tabellen 5-9 und 5-10 dargestellt. Eine auch hier durchgeführte Winkeltransformation führte zu den Ergebnissen der Tabellen 5-11 und 5-12.

Wie bei den normalverteilten Verspätungen läßt sich auch hier eine angenäherte Symmetrie in der Verteilung der Belegungsgrade beobachten, wobei wiederum ein starker positiver Exzeß vorhanden ist.

5.3.5 Empirisch verteilte Verspätungen

Die Analyse der Verteilung von Verspätungen in verschiedenen Anfangsbahnhöfen einer Strecke wird nur in seltenen Fällen zu dem Ergebnis führen, daß sich die empirische Verteilung exakt durch eine theoretische Verteilung approximieren läßt.[1)] Die Simulation ist deshalb auch für den Fall durchgeführt worden, daß aus dem erhobenen Datenmaterial keine Schlüsse auf eine theoretische Verteilung der Verspätungen in der Grundgesamtheit gezogen werden können. Die empirische Verteilung der diskreten Zufallsgröße V ist bereits in Tabelle 5-1 dargestellt worden. Um Realisationen v_i von V mit Hilfe von (0;1)-gleichverteilten Zufallszahlen z zu erzeugen, werden Zufallszahlen z den Stufen der kumulativen Häufigkeit

---

1) Auf die Problematik der Unterstellung einer Exponentialverteilung in der vorhergehenden Untersuchung ist im Abschnitt 5.2 hingewiesen worden.

TABELLE 5-13: ERGEBNIS EINES SIMULATIONSLAUFES FUER EMPIRISCH VERTEILTE VERSPAETUNGEN

ZUG NR.	ABF. F(I)	VERSP. V(I)	ABF. E(I)	PUFFERZEIT PLAN	PUFFERZEIT EFF.	PLANABWEICHUNG
1	2	3	4	5	6	7
1	0.06	4	0.10	7	4	4
3	0.23	1	0.24	20	20	1
5	0.53	1	0.54	4	4	1
6	1.06	12	1.18	1	0	12
7	1.14	0	1.25	1	0	11
8	1.19	1	1.29	4	0	10
9	1.26	1	1.32	0	0	6
11	1.30	2	1.36	75	70	5
19	3.35	1	3.36	10	10	1
20	3.50	10	4.00	23	13	12
26	4.44	0	4.44	5	5	0
29	5.01	0	5.01	0	0	0
30	5.04	0	5.04	17	17	0
33	5.38	4	5.42	19	15	4
35	6.08	0	5.08	14	14	0
37	6.33	1	6.34	20	20	1
38	6.56	2	7.00	5	3	2
39	7.12	0	7.12	0	0	0
40	7.17	1	7.18	2	2	1
41	7.27	5	7.32	0	0	5
42	7.30	1	7.35	1	0	5
43	7.43	3	7.47	5	2	4
45	7.56	1	7.57	3	3	1
47	8.15	1	8.16	0	0	1
48	8.18	1	8.19	15	15	1
49	8.38	2	8.40	0	0	2
50	8.42	1	8.44	25	23	2
52	9.21	0	9.21	10	10	0
54	9.41	1	9.42	5	5	1
55	10.00	0	10.00	11	11	0
56	10.15	0	10.15	2	2	0
57	10.21	1	10.22	3	2	1
59	10.34	0	10.34	5	5	0
62	10.49	0	10.49	1	1	0
63	11.03	1	11.04	4	3	1
65	11.18	0	11.18	5	6	0
67	11.36	7	11.43	3	3	7
68	11.43	7	11.50	2	0	7
69	11.49	0	11.54	10	5	5
70	12.04	0	12.04	3	3	0
71	12.16	2	12.18	18	17	2
74	12.51	1	12.52	10	9	1
75	13.04	0	13.04	8	8	0
76	13.23	0	13.23	1	1	0
77	13.28	2	13.30	5	5	2
79	13.40	8	13.48	1	0	8
80	13.55	1	14.00	1	0	5
81	14.00	1	14.04	1	0	4
82	14.15	1	14.18	7	7	3
84	14.35	3	14.38	5	3	3
85	14.45	0	14.45	0	0	0
86	14.57	3	15.00	1	0	3
87	15.01	2	15.03	5	4	2
89	15.19	1	15.20	4	3	1
90	15.32	0	15.32	19	19	0
92	15.58	1	15.59	21	21	1
94	16.34	4	16.38	1	0	4
95	16.38	0	16.41	13	13	3
96	16.56	11	17.07	6	0	11
98	17.19	1	17.24	1	0	5
99	17.24	1	17.28	0	0	4
100	17.27	2	17.31	2	0	4
101	17.41	0	17.43	10	8	2
102	17.54	0	17.54	7	7	0
103	18.14	0	18.14	1	1	0
104	18.19	0	18.19	5	5	0
106	18.35	0	18.35	3	3	0
108	18.45	6	18.51	5	2	5
109	18.54	2	18.56	12	10	2
111	19.17	0	19.17	13	10	0
113	19.44	2	19.46	6	5	2
114	19.54	1	19.55	5	4	1
116	20.04	0	20.04	0	0	0
117	20.17	0	20.17	32	32	0
120	21.01	1	21.02	0	0	1
121	21.10	1	21.11	7	7	1
122	21.28	1	21.29	7	6	1
124	21.49	0	21.49	20	20	0
126	22.16	0	22.16	6	6	0
127	22.40	6	22.46	6	1	5
129	22.55	3	22.58	1	0	3
131	23.04	0	23.06	1	0	2
132	23.08	1	23.09	1	1	1
133	23.18	4	23.22	5	2	4
134	23.27	0	23.27	8	8	0
137	23.56	0	23.56	5	5	0

PUFFERZEITSUMME (PLAN): 666
PUFFERZEITSUMME (EFF.): 557

E(V) = 1.9157
STD.ABW.= 2.3878

BELEGUNGSGRAD: 0.6132

148.SIMULATIONSLAU-

TABELLE 5-14: HAEUFIGKEITSVERTEILUNG DER BELEGUNGSGRADE BEI EMPIRISCH VERTEILTEN VERSPAETUNGEN

INTERVALL				HAEUFIGKEITEN	V.H.
		BIS	0.5788	0	0.0
UE.	0.5788	BIS	0.5832	0	0.0
UE.	0.5832	BIS	0.5875	1	0.000
UE.	0.5875	BIS	0.5919	14	0.007
UE.	0.5919	BIS	0.5962	44	0.022
UE.	0.5962	BIS	0.6006	124	0.062
UE.	0.6006	BIS	0.6050	307	0.153
UE.	0.6050	BIS	0.6093	367	0.183
UE.	0.6093	BIS	0.6137	345	0.172
UE.	0.6137	BIS	0.6181	362	0.181
UE.	0.6181	BIS	0.6224	193	0.096
UE.	0.6224	BIS	0.6268	132	0.066
UE.	0.6268	BIS	0.6312	65	0.032
UE.	0.6312	BIS	0.6355	35	0.017
UE.	0.6355	BIS	0.6399	8	0.004
UE.	0.6399	BIS	0.6442	1	0.000
UE.	0.6442			2	0.001

E(B) = 0.611519
STD.ABW. = 0.010910

TABELLE 5-15: VERTEILUNG DER BELEGUNGSGRADE BEI EMPIRISCH VERTEILTEN VERSPAETUNGEN

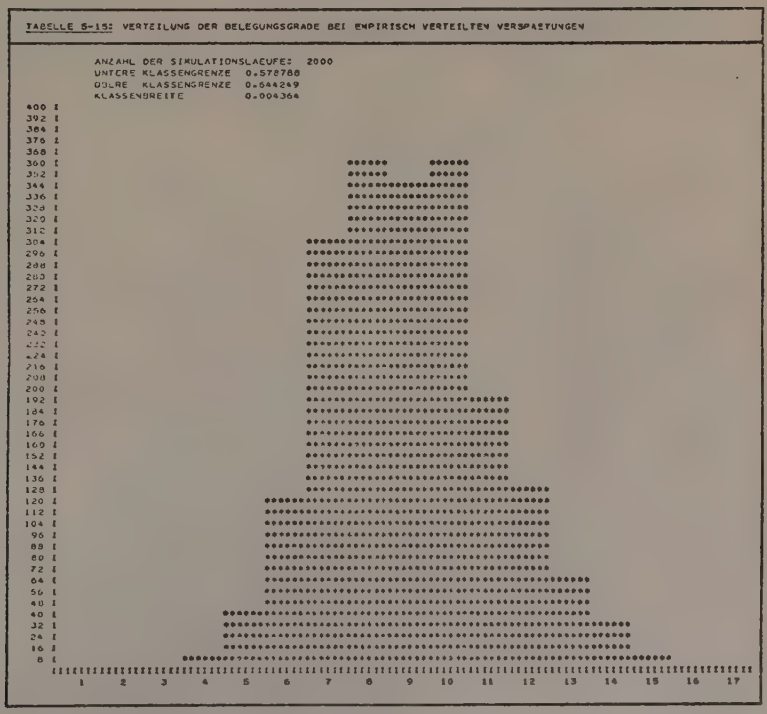
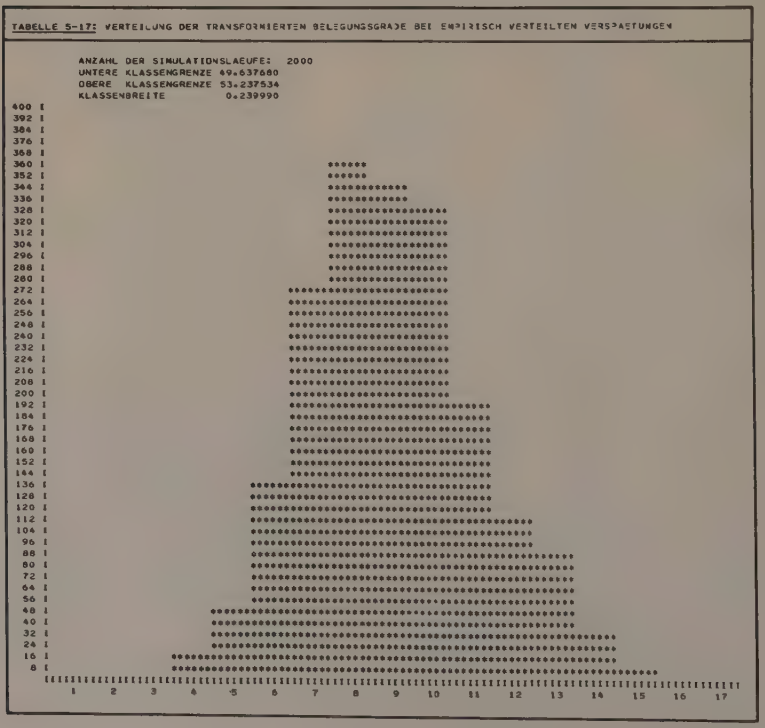


TABELLE 5-16: HAEUFIGKEITSVERTEILUNG TRANSFORMIERTER BELEGUNGSGRADE BEI EMPIRISCH VERTEILTEN VERSPAETUNGEN

INTERVALL		HAEUFIGKEITEN	V.H.
	BIS 49.6377	0	0.0
UE.49.6377	BIS 49.8777	0	0.0
UE.49.8777	BIS 50.1177	3	0.001
UE.50.1177	BIS 50.3577	16	0.008
UE.50.3577	BIS 50.5976	53	0.026
UE.50.5976	BIS 50.8376	143	0.071
UE.50.8376	BIS 51.0776	275	0.137
UE.51.0776	BIS 51.3176	367	0.183
UE.51.3176	BIS 51.5576	345	0.172
UE.51.5576	BIS 51.7976	335	0.167
UE.51.7976	BIS 52.0376	198	0.099
UE.52.0376	BIS 52.2776	115	0.057
UE.52.2776	BIS 52.5176	94	0.047
UE.52.5176	BIS 52.7576	38	0.019
UE.52.7576	BIS 52.9975	10	0.005
UE.52.9975	BIS 53.2375	6	0.003
UE.53.2375		2	0.001

E(B) = 51.437683
STD.ABW. = 1.090508

TABELLE 5-17: VERTEILUNG DER TRANSFORMIERTEN BELEGUNGSGRADE BEI EMPIRISCH VERTEILTEN VERSPAETUNGEN



$F(v_i)$ zugeordnet. Der Erzeugung zufälliger Verspätungen liegt dann die Gleichung zugrunde

$$W(V = v_i) = W\left[F(v_{i-1}) < z \leq F(v_i)\right]$$ 1)

Nach dieser Gleichung wurden die Verspätungen für die Simulation des Tagesfahrplans erezugt, der in Tabelle 5-13 dargestellt ist.

Für 2000 Simulationsläufe wurde ein Belegungsgrad von $E(B_{emp}) = 0{,}6115$ bei einer Standardabweichung von $s_B = 0{,}0109$ ermittelt. Die Tabellen 5-14 und 5-15 zeigen die Häufigkeitsverteilung und das Histogramm der Belegungsgrade bei empirisch verteilten Verspätungen. Durch die Arcus-Sinus-Transformation wird eine Annäherung der ursprünglich leicht linkssteilen Verteilung an eine symmetrische Form (vgl. Tabelle 5-16 und 5.17) erreicht. Auch hier ist infolge der geringen Standardabweichung wieder ein starker positiver Exzeß zu beobachten.

5.3.6 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Eine Simulation der Abfahrtszeiten mit Hilfe alternativer Verspätungsverteilungen wurde vorgenommen, um Obergrenzen für den Belegungsgrad, die mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden, angeben zu können. Die Hypothese, daß die Verteilung der simulierten Belegungsgrade durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann, konnte bei Überprüfung durch einen χ^2-Test nicht aufrecht erhalten werden. Der Grund dafür dürfte sein, daß die Grenzen, inner-

---

1) In Tabelle 5-1 auf S.88 entspricht also z.B. der Zufallszahl 0,67 eine Verspätung von 2 Minuten. Der z-Bereich für $v_i = 2$ ist gegeben mit $0{,}56 < z \leq 0{,}73$.

halb derer sich die Zufallsgröße Verspätung bewegen konnte, aufgrund der Parameter, die aus den verfügbaren empirischen Daten geschätzt werden konnten, außerordentlich eng waren. Um deshalb den maximalen Belegungsgrad, der für bestimmte Strecken bei einem vorgegebenen Fahrplan zu erwarten ist, statistisch gesichert zu ermitteln, müßte eine genaue Analyse der Ankunftszeiten der Züge im Anfangsbahnhof der Strekke vorausgehen. Außerdem müßten die während der einzelnen Zugfahrten auf der Strecke selbst beobachteten Verspätungen mit in das Modell einbezogen werden, da sie den Belegungsgrad nicht unerheblich beeinflussen.[1)]

Für die untersuchte Strecke AF ergab sich ein Belegungsgrad von ca. 61%. Wenn man davon ausgeht, daß aus Sicherheitsgründen eine durchschnittliche Pufferzeit von 5 Minuten erforderlich ist, dann ergibt sich bei 86 Zügen eine Mindestpufferzeit von 435 Minuten, die einem Belegungsgrad von 69,8% entspricht. Bei nur geringfügiger Parameteränderung[2)] der unterstellten Verspätungsverteilung wurden aber bereits Belegungsgrade von ca. 68% simuliert.

Ähnlichen Arbeiten müßte deshalb eine gründliche Analyse über die Verspätungen der im Anfangsbahnhof eintreffenden Züge sowie über mögliche Störfaktoren auf der Strecke selbst, durch die weitere Verspätungen hervorgerufen werden, vorangestellt werden. Die Simulation dieser Verspätungen könnte ohne Schwierigkeiten in das Modell einbezogen werden.

---

1) Für die untersuchte Strecke lagen hierüber keine Informationen vor.

2) Vgl. dazu Abschnitt 5.3.3, S.100.

6 SCHLUSSBETRACHTUNG

Anliegen der vorliegenden Arbeit war es, neben der Darstellung der bereits bekannten Methoden zur Bestimmung des Belegungsgrades von Eisenbahnstrecken ein anwendungsorientiertes Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe es möglich ist, eine obere Grenze für den Belegungsgrad beliebiger Strecken anhand eines Bildfahrplanes und des zugehörigen streckenspezifischen Datenmaterials anzugeben.

Die Bestimmung dieser Obergrenze vollzieht sich in mehreren Schritten. Zunächst müssen für sämtliche Teilabschnitte einer Gesamtstrecke die Pufferzeiten zwischen den Zügen untersucht werden. Negative Pufferzeiten bzw. Pufferzeiten von Null deuten auf Fehler in der Fahrplangestaltung hin[1] und sollten möglichst gleich korrigiert werden.[2] Ein Vergleich der Belegungsgrade der Einzelabschnitte gibt Aufschlüsse darüber, welcher Abschnitt besonders stark belastet ist und als Engpaßabschnitt der Strecke bezeichnet werden kann.[3] Über den Belegungsgrad der Gesamtstrecke läßt sich nach der Ermittlung der Einzelbelegungsgrade noch keine Aussage treffen.

Einen Anhaltspunkt für den Belegungsgrad der Gesamtstrecke[4] erhält man nach Beendigung des zweiten Schrittes. In diesem

---

1) Für das untersuchte Beispiel wurden diese Fehler bei der Auswertung der Tabellen 4-3 bis 4-7 (S.58 bis S.62 dieser Arbeit) ersichtlich.

2) Das läßt sich oft durch eine geringfügige zeitliche Verschiebung der Abfahrtszeiten erreichen.

3) Für die Strecke AF war das der Abschnitt 4 (vgl. Tabelle 4-8 auf S.63) mit 39,0%.

4) Der Gesamtbelegungsgrad ergibt sich aus der Pufferzeitsumme am Ende der Tabelle 4-11. Für die untersuchte Strekke ergab sich (vgl. S. 7 der Tabelle 4-11 auf S.68 dieser Arbeit) $B_{1,5} = \frac{1440-646}{1440} \cdot 100 = 55,1\%$.

zweiten Schritt wird mit Hilfe des im Abschnitt 3.5 entwickelten Algorithmus' der Gesamtbelegungsgrad der vorgegebenen Strecke berechnet. Dieser Belegungsgrad kann deshalb nur ein Anhaltspunkt sein, weil man bei seiner Berechnung davon ausgeht, daß der zugrunde liegende Fahrplan ohne Störungen des Betriebsablaufs abgewickelt wird.

Im praktischen Betriebsablauf ist der Belegungsgrad aber von verschiedenen stochastischen Störgrößen abhängig, die zusammengefaßt werden können unter der Zufallsvariablen "Verspätung". Für den Fall, daß eine genügend große Stichprobe eine zuverlässige Schätzung der Parameter der Verteilung der Verspätungen auf der untersuchten Strecke zuläßt, lassen sich aufgrund der Ergebnisse eines Simulationsmodells mit vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeiten Obergrenzen für den Belegungsgrad angeben.[1)] Anhand dieser Obergrenzen muß überprüft werden, ob durch sie nicht bestimmte Restriktionen der Realität verletzt werden. Es muß z.B. sichergestellt sein, daß die durchschnittliche Pufferzeit zwischen den aufeinanderfolgenden Zügen etwa 5 Minuten beträgt.[2)] Bei Verletzung irgendwelcher gewünschter Kriterien müßte eine Korrektur des Fahrplans vorgenommen werden.[3)]

---

1) Falls sich, wie in dem untersuchten Beispiel, keine Normalverteilung der Belegungsgrade ergibt, kann eine Obergrenze bei einer genügend großen Anzahl von Simulationsläufen auch aufgrund der ermittelten Häufigkeitsverteilung der Belegungsgrade angegeben werden. Für empirisch verteilte Verspätungen ergab sich z.B. (vgl. Tabelle 5-14 auf S.111), daß in 5,4% aller Fälle der Belegungsgrad über 62,68% lag, so daß mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 95% angenommen werden kann, daß die Obergrenze für den Belegungsgrad der untersuchten Strecke AF bei 62,7% liegt.

2) Bei n = 86 Zügen wird diese Restriktion verletzt, wenn die Pufferzeitsumme kleiner als 87·5 = 435 wird, bzw. die Obergrenze für den Belegungsgrad über 69,79% liegt.

3) Es wäre programmtechnisch unproblematisch, den Einfluß solcher Korrekturen anhand einer Sensitivitätsanalyse sichtbar zu machen und gegebenenfalls iterativ weitere Fahrplankorrekturen vorzunehmen.

Folgende Punkte, die bei einer Modellerstellung "dringend zu beachten" sind,[1] wurden beim Aufbau des Simulationsmodells berücksichtigt:

1. Der Fahrplan, aufgrund dessen der Belegungsgrad ermittelt werden sollte, ist exakt abgebildet worden. Als Merkmale, die in der Realität den Belegungsgrad beeinflussen, sind die Verspätungen in das Modell aufgenommen worden.

2. Die Untersuchung läßt sich auf einer Rechenanlage leicht durchführen. Die benötigte Rechenzeit für 2000 Simulationsläufe beträgt weniger als 5 Minuten.[2]

3. Das Modell ist so flexibel, daß der Einfluß von Störfaktoren auf der untersuchten Strecke selbst (z.B. die Einrichtung einer Baustelle) ohne Schwierigkeiten miteinbezogen werden könnte.

4. Das Modell ist so allgemeingültig, daß bei Veränderungen der Eingabedaten eine Untersuchung beliebiger Eisenbahnstrecken hinsichtlich ihres Belegungsgrades möglich ist.

5. Bezüglich der Ein- und Ausgabedaten ist das Modell so flexibel, daß der Einfluß von Fahrplankorrekturen jederzeit ausgetestet werden kann; andererseits ist auch eine Beschränkung der Simulation auf bestimmte Tageszeiten, z.B. Verkehrsspitzenzeiten, möglich.

In Verbindung mit den ersten beiden Schritten, die als "Datenaufbereitung" charakterisiert werden können, erscheint das Modell somit geeignet, als Hilfsmittel bei Problemen der praktischen Fahrplangestaltung, die sich im Eisenbahnbetrieb täglich neu stellen, verwendet werden zu können.

---

1) Vgl. R. KOXHOLT, a.a.O., S. 31.

2) Bei Verwendung normalverteilter Zufallszahlen ist allerdings eine Rechenzeit von über 20 Minuten erforderlich.

A N H A N G

TABELLE 4-10 : KUERZESTE PUFFERZEITEN UND ZUGEHOERIGE STRECKENABSCHNI
FUER DIE VERKNUEPFUNGEN DER STRECKE AF

1.ZUG	2.ZUG	PUFFERZEIT	ABSCHNITT
1	2	3	2
1	3	13	1
2	3	4	4
3	4	0	2
3	5	26	1
4	5	20	4
5	6	4	5
6	7	1	5
7	8	1	5
8	9	4	1
9	10	0	4
9	11	0	1
10	11	0	4
11	12	15	2
11	13	26	1
11	19	120	5
12	13	4	4
13	14	6	2
13	19	89	1
14	15	1	2
14	16	31	4
15	16	25	2
16	17	3	4
17	18	12	4
17	19	29	3
18	19	9	4
19	20	10	1
20	21	5	2
20	22	12	4
20	26	41	5
21	22	4	2
22	23	8	4
23	24	4	2
23	25	0	4
24	26	3	3
25	26	6	4
26	27	3	4
26	28	5	2
26	29	15	1
27	28	0	4
28	29	2	4
29	30	0	1
30	31	11	2
30	32	3	4
30	33	24	5
31	33	7	3
32	33	14	4

TABELLE 4-10 : KUERZESTE PUFFERZEITEN UND ZUGEHOERIGE STRECKENABSCHNITTE FUER DIE VERKNUEPFUNGEN DER STRECKE AF -2-

1.ZUG	2.ZUG	PUFFERZEIT	ABSCHNITT
33	34	3	2
33	35	21	5
34	35	16	3
35	36	0	4
35	37	21	2
36	37	14	4
37	38	20	3
38	39	5	5
39	40	0	3
40	41	2	5
41	42	0	1
42	43	1	5
43	44	1	2
43	45	9	1
44	45	4	4
45	46	0	2
45	47	3	5
46	47	4	3
47	48	0	1
48	49	16	1
49	50	0	1
50	51	11	2
50	52	35	5
51	52	14	4
52	53	2	2
52	54	16	1
53	54	8	4
54	55	6	5
55	56	11	1
56	57	2	1
57	58	0	3
57	59	9	4
58	59	3	3
59	60	1	2
59	61	1	4
59	62	12	1
60	62	4	3
61	62	9	4
62	63	1	5

TABELLE 4-10 : KUERZESTE PUFFERZEITEN UND ZUGEHOERIGE STRECKENABSCHNI
FUER DIE VERKNUEPFUNGEN DER STRECKE AF

1.ZUG	2.ZUG	PUFFERZEIT	ABSCHNITT
63	64	0	4
63	65	11	5
64	65	4	4
65	66	2	4
65	67	14	1
66	67	4	4
67	68	3	1
68	69	2	1
69	70	10	5
70	71	8	1
71	72	0	2
71	74	24	5
72	73	5	2
72	74	18	4
73	74	13	3
74	75	10	1
75	76	8	5
76	77	1	5
77	78	0	4
77	79	8	1
78	79	5	4
79	80	3	5
80	81	1	1
81	82	1	5
82	83	1	2
82	84	17	1
83	84	6	4
84	85	6	1
85	86	0	5
86	87	1	1
87	88	1	2
87	89	12	5
88	89	4	4
89	90	4	5
90	91	8	4
90	92	30	5
91	92	11	1

TABELLE 4-10 : KUERZESTE PUFFERZEITEN UND ZUGEHOERIGE STRECKENABSCHNITTE FUER DIE VERKNUEPFUNGEN DER STRECKE AF -4-

1.ZUG	2.ZUG	PUFFERZEIT	ABSCHNITT
92	93	0	4
92	94	25	5
93	94	21	4
94	95	1	1
95	96	13	5
96	97	0	2
96	98	9	5
97	98	6	4
98	99	1	1
99	100	0	1
100	101	2	5
101	102	10	1
102	103	7	5
103	104	1	5
104	105	5	1
104	106	13	5
105	106	1	3
106	107	0	4
106	108	6	1
107	108	3	5
108	109	6	1
109	110	0	2
109	111	19	5
110	111	12	3
111	112	5	2
111	113	15	5
112	113	5	4
113	114	6	5
114	115	0	4
114	116	7	1
115	116	5	4
116	117	0	5
117	118	5	2
117	120	41	1
118	119	21	4
119	120	6	2
120	121	0	5
121	122	7	5

TABELLE 4-10 : KUERZESTE PUFFERZEITEN UND ZUGEHOERIGE STRECKENABSCHNIT
FUER DIE VERKNUEPFUNGEN DER STRECKE AF

1.ZUG	2.ZUG	PUFFERZEIT	ABSCHNITT
122	123	6	2
122	124	18	1
123	124	1	4
124	125	7	2
124	126	24	1
125	126	13	4
126	127	6	5
127	128	0	1
127	129	9	5
128	129	4	3
129	130	0	4
129	131	6	1
130	131	1	5
131	132	1	1
132	133	1	4
133	134	6	1
134	135	0	2
134	136	12	1
134	137	18	5
135	136	4	4
136	137	4	4
137	1	6	5

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 1 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
1	1	3	7	7	A: 1 2 3 B: 2 4
2	3	5	20	27	A: 3 4 5 B: 2 4
3	5	6	4	31	A: 5 6 B: 5
4	6	7	1	32	A: 6 7 B: 5
5	7	8	1	33	A: 7 8 B: 5
6	8	9	4	37	A: 8 9 B: 1
7	9	11	0	37	A: 9 11 B: 1
8	11	19	75	112	A: 11 12 13 14 15 16 17 18 19 B: 2 4 2 2 2 4 4 4
9	19	20	10	122	A: 19 20 B: 1
10	20	26	23	145	A: 20 21 22 23 25 26 B: 2 2 4 4 4
11	26	29	5	150	A: 26 27 28 29 B: 4 4 4
12	29	30	0	150	A: 29 30 B: 1
13	30	33	17	167	A: 30 32 33 B: 4 4

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 2 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
14	33	35	19	186	A: 33 34 35 B: 2 3
15	35	37	14	200	A: 35 36 37 B: 4 4
16	37	38	20	220	A: 37 38 B: 3
17	38	39	5	225	A: 38 39 B: 5
18	39	40	0	225	A: 39 40 B: 3
19	40	41	2	227	A: 40 41 B: 5
20	41	42	0	227	A: 41 42 B: 1
21	42	43	1	228	A: 42 43 B: 5
22	43	45	5	233	A: 43 44 45 B: 2 4
23	45	47	3	236	A: 45 47 B: 5
24	47	48	0	236	A: 47 48 B: 1
25	48	49	16	252	A: 48 49 B: 1
26	49	50	0	252	A: 49 50 B: 1
27	50	52	25	277	A: 50 51 52 B: 2 4

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 3 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	5
28	52	54	10	287	A: 52 53 54 B: 2 4
29	54	55	6	293	A: 54 55 B: 5
30	55	56	11	304	A: 55 56 B: 1
31	56	57	2	306	A: 56 57 B: 1
32	57	59	3	309	A: 57 58 59 B: 3 3
33	59	62	5	314	A: 59 60 62 B: 3
34	62	63	1	315	A: 62 63 B: 5
35	63	65	4	319	A: 63 64 65 B: 4 4
36	65	67	6	325	A: 65 66 67 B: 4 4
37	67	68	3	328	A: 67 68 B: 1
38	68	69	2	330	A: 68 69 B: 1
39	69	70	10	340	A: 69 70 B: 5
40	70	71	8	348	A: 70 71 B: 1
41	71	74	18	366	A: 71 72 74 B: 2 4

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 4 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
42	74	75	10	376	A: 74 75 B: 1
43	75	76	8	384	A: 75 76 B: 5
44	76	77	1	385	A: 76 77 B: 5
45	77	79	5	390	A: 77 78 79 B: 4 4
46	79	80	3	393	A: 79 80 B: 5
47	80	81	1	394	A: 80 81 B: 1
48	81	82	1	395	A: 81 82 B: 5
49	82	84	7	402	A: 82 83 84 B: 2 4
50	84	85	6	408	A: 84 85 B: 1
51	85	86	0	408	A: 85 86 B: 5
52	86	87	1	409	A: 86 87 B: 1
53	87	89	5	414	A: 87 88 89 B: 2 4
54	89	90	4	418	A: 89 90 B: 5
55	90	92	19	437	A: 90 91 92 B: 4 1

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 5 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
56	92	94	21	458	A: 92 93 94 B: 4 4
57	94	95	1	459	A: 94 95 B: 1
58	95	96	13	472	A: 95 96 B: 5
59	96	98	6	478	A: 96 97 98 B: 2 4
60	98	99	1	479	A: 98 99 B: 1
61	99	100	0	479	A: 99 100 B: 1
62	100	101	2	481	A: 100 101 B: 5
63	101	102	10	491	A: 101 102 B: 1
64	102	103	7	498	A: 102 103 B: 5
65	103	104	1	499	A: 103 104 B: 5
66	104	106	6	505	A: 104 105 106 B: 1 3
67	106	108	3	508	A: 106 107 108 B: 4 5
68	108	109	6	514	A: 108 109 B: 1
69	109	111	12	526	A: 109 110 111 B: 2 3

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 6 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
70	111	113	10	536	A: 111 112 113 B: 2 4
71	113	114	6	542	A: 113 114 B: 5
72	114	116	5	547	A: 114 115 116 B: 4 4
73	116	117	0	547	A: 116 117 B: 5
74	117	120	32	579	A: 117 118 119 120 B: 2 4 2
75	120	121	0	579	A: 120 121 B: 5
76	121	122	7	586	A: 121 122 B: 5
77	122	124	7	593	A: 122 123 124 B: 2 4
78	124	126	20	613	A: 124 125 126 B: 2 4
79	126	127	6	619	A: 126 127 B: 5
80	127	129	4	623	A: 127 128 129 B: 1 3
81	129	131	1	624	A: 129 130 131 B: 4 5
82	131	132	1	625	A: 131 132 B: 1
83	132	133	1	626	A: 132 133 B: 4

TABELLE 4-11: MINIMALE GESAMTPUFFERZEITEN ZWISCHEN DURCHFAHRENDEN ZUEGEN - SEITE 7 -

ZUGPAAR	1.ZUG	2.ZUG	R(MIN)	SUMME R(MIN)	A = ZUGFOLGE B = ABSCHNITTSFOLGE
1	2	3	4	5	6
84	133	134	6	632	A: 133 134 B: 1
85	134	137	8	640	A: 134 135 136 137 B: 2 4 4
86	137	1	6	646	A: 137 1 B: 5

LITERATURVERZEICHNIS

ADLER, G.: Die Verkettung der Streckenbelegungen und der Belegungsgrad einer Gesamtstrecke. Diss. Dresden, 1968.

BARANOW, A.M./KARETNIKOW, A.D.: Neues Verfahren zur Berechnung der Durchlaßfähigkeit der Eisenbahnen. In: Shelesn. Transp. Moskau, 1962, Übersetzung 2153 des Dokumentationsdienstes der DB.

BEHR, E.: Der Fahrtenabhängigkeitsplan für große Personenbahnhöfe. In: Org. Fortschr. Eisenbahnwesen 93 (1938), H. 14, S. 259-267.

BIANCHI, M.: Potenzialità di linee ferroviarie (Die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken). In: Ingegneria Ferroviaria, Rom, 1964, H. 12, S. 981-993. - Übersetzung 2735 des Dokumentationsdienstes der DB.

BUSACKER, R.G./SAATY, M.L.: Endliche Graphen und Netzwerke. München/Wien, 1968.

BUSLENKO, N.P./SCHREIDER, J.A.: Monte-Carlo-Methode und ihre Verwirklichung mit elektronischen Digitalrechnern. Leipzig, 1964.

CHURCHMAN, C.W./ACKOFF, R.L./ARNOFF, E.L.: Operations Research Eine Einführung in die Unternehmensforschung. Wien/München, 1961.

COATES, P.J./CLARK, P.W.: Ein für den Eisenbahnbetrieb anwendbares Simulationsverfahren. In: Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongreß-Vereinigung: Kybernetik und Elektronik bei den Eisenbahnen, H. 1, S.42-46, 1968.

DILLI, G.: Ihre Majestät, die Toleranz. In: Eisenbahntechnische Raundschau, 1952, H. 1, S. 21-28 und H. 2, S. 60-68.

DILLI, G.: Der wandernde Engpaß und sein Gefolge. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 1954, H. 1, S. 1-11 und H. 2, S. 63-80.

EMSHOFF, J.R./SISSON, R.L.: Design and Use of Computer Simulation Models, 2nd printing, London/New York/Toronto, 1971.

GOTTSCHALK, P.: Die betriebliche Leistungsfähigkeit der Hohenzollernbrücke in Köln. In: Archiv Eisenbahntechnik, Eisenbahntechnische Rundschau, 1952, S. 3-10.

GREMMINGER, G.: Die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken - eine Folge des geringsten Zugabstandes. Diss. 1955, Braunschweig.

HAMMERSLEY, J.M./HANDSCOMB, D.C.: Monte Carlo Methods. London, 1964.

HAPPEL, O.: Sperrzeitstudien und Fahrstraßenknotenuntersuchungen. Eisenbahntechnische Rundschau, 1971, H. 5, S. 208-219.

HILLER, W.: Beitrag zur Ermittlung der größten Streckenbelegung. Dt. Eisenbahntechnik, 1968, H. 8, S. 391-392.

KAHN,H./MARSHALL, A.W.: Methods of Reducing Sample Size in Monte Carlo Computations. In: Operations Research, 1953, Vol. 1, S. 263-278.

KOXHOLT, R.: Die Simulation, ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung. München/Wien, 1967.

MATTYS, G./RICARD, M.: Etude du Dèbit maximum en Marches R. O. Directes entre deux triages d'une Section de double Voie non banalisée siège d'un Trafic Prioritaire. In: Revue Francaise de Recherche Opérationelle, Nr. 15, 1960, S. 117-164.

MERTENS, P.: Simulation. (Betriebswirtschaftliche Studienbücher, Reihe IV, Nr. 61, Hrsg. H. Seischab), Stuttgart, 1969.

MICHELFELDER, W.: Verspätungsübertragung bei dichtem Zugverkehr und ihre Auswirkung auf Fahrplangestaltung, Streckenleistung und Signaltechnik. Diss. Darmstadt, 1950.

MÜLLER, W.: Eisenbahnanlagen und Fahrdynamik. Band 2, Berlin, 1952.

NEUMANN, v. J./FORSYTHE, J.E./HAMMER, P.C.: Monte Carlo Methods. Washington, 1951.

POTTHOFF, G.: Verkehrsströmungslehre. Band 1, - die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen. Berlin, 1962.

SACHS, L.: Statistische Auswertungsmethoden. 3. Aufl., Heidelberg/New York, 1972.

TAKAHASHI, T.: Theorien zur Berechnung der Gleiskapazität. In: Japan Railways Engg. Tokio, 1962, H. 3, Übersetzung 2211 des Dok. Dienstes der DB.

THOMAS, C.J./DEEMER, W.L.: The Role of Operational Gaming in Operations Research. In: Operations Research, 1957, Vol. 5, S. 1-27.

ZIMMER, G.: Gleisbild und Fahrplan einer langen zweigleisigen Eisenbahnstrecke. In: Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongreß-Vereinigung: Kybernetik und Elektrotechnik bei den Eisenbahnen, 1968, H. 4, S. 152-173.

ZWERNEMANN, W.: Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit zweigleisiger Strecken durch Berechnung der Mindestzugfolgezeiten. Bundesbahn 35 (1961), S. 650-661.

L E B E N S L A U F

Peter Westerheide	4403 Hiltrup, Bodelschwinghstr.40
geboren am	9.6.1941 in Insterburg(Ostpr.).
Staatsangehörigkeit	deutsch.
Eltern	Staatsanwalt Friedrich Westerheide (gefallen 1945 in Ungarn) und Ehefrau Margarete, geb. Hötte.
Schulen	1948-1952 Volksschule in Hamm i.W., ab Ostern 1952 Humanistisches Gymnasium Hammonense in Hamm.
Reifeprüfung	27.2.1962 .
Studiengang	Studium der Volkswirtschaftslehre von SS 1962 bis SS 1964 an der Universität in Hamburg, ab WS 64/65 an der Universität in Münster.
Studienabschluß	Diplom - Prüfung für Volkswirte am 12.10.1967
Berufspraxis	1.12.67-31.7.69: wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Ökonometrie und Wirtschaftsstatistik der Universität Münster. 1.8.69-31.8.72: Verwalter einer wissenschaftlichen Assistentenstelle am gleichen Institut. Ab 1.9.1972: Dozent an der Fachhochschule Münster, Fachbereich Wirtschaft.